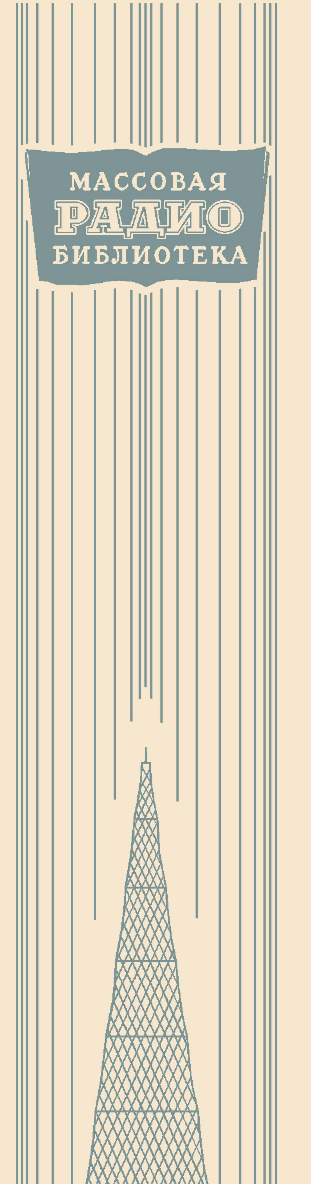
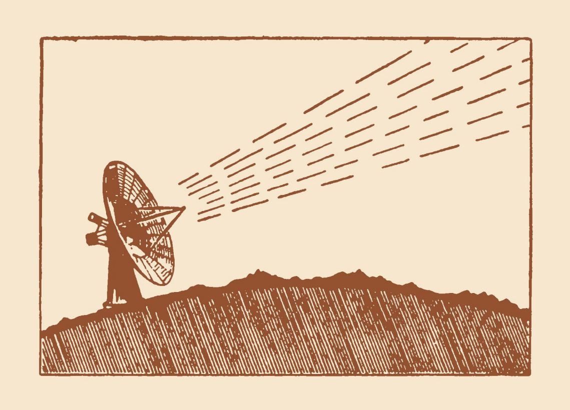


Г. П. ГРУДИНСКАЯ

РАСПРОСТРАНЕНИЕ УЛЬТРАКОРОТКИХ РАДИОВОЛН





ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

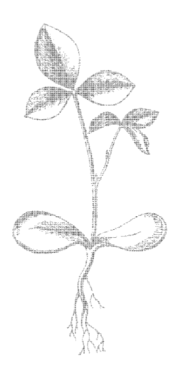
1957

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 281

Г. П. ГРУДИНСКАЯ

РАСПРОСТРАНЕНИЕ УЛЬТРАКОРОТКИХ РАДИОВОЛН







ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

МОСКВА 1957 ЛЕНИНГРАД

Брошюра охватывает основные вопросы распространения ультракоротких радиоволн, знакомя с результатами новейших исследований в этой области. В ней дается объяснение различных случаев дальнего приема УКВ и некоторые рекомендации по дальнему приему.

Брошюра рассчитана главным образом на квалифицированных радиолюбителей, работающих в области УКВ, и может быть полезна при расчете напряженности поля в простейших случаях.

Автор — *Грудинская Галина Петровна*

* * *

Редактор *П. О. Чечик* Техн. редактор *Г. Е. Ларионов*

Сдано в пр-во 5/VI 1957 г. Подписано к печати 17/IX 1957 г.
Бумага 84×108 1/32 3,28 п. л. Уч.-изд. л. 3,7
Т-09023 Тираж 30 000 Цена 1 р. 50 к. Заказ 383

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

ВВЕДЕНИЕ

За последние десятилетия все шире и быстрее стало развиваться применение ультракоротких радиоволн. Интерес к этому диапазону радиоволн связан с развитием радиолокации, новых видов радиосвязи, телевидения, радиовещания с частотной модуляцией и пр., которые потребовали передачи широкой полосы излучаемых частот. Широкая полоса частот может быть излучена только на радиоволнах ультракоротковолнового диапазона. Кроме того, все другие диапазоны и, в частности, коротковолновый, настолько загружены, что желательно перевести в диапазон УКВ возможно большее число линий связи. Это тем более важно, что, как выяснено в последнее время, регулярная связь на УКВ на расстояние свыше 1 000 *км* возможна, причем УКВ линии связи в арктических районах не подвержены нарушениям связи, свойственным коротким волнам.

Ультракороткими называются радиоволны короче 10 *м* (частота выше 30 *Мгц*). Со стороны низких частот диапазон УКВ примыкает к коротким волнам, а со стороны высоких — граничит с длинными инфракрасными лучами. Граница УКВ 10 *м* была определена тем, что, как ранее считалось, на эти волны верхние слои атмосферы (ионосферы), как правило, уже не оказывают влияния, и они могут распространяться только на небольшие расстояния.

Диапазон УКВ можно разбить на четыре поддиапазона: метровые волны (10—1 *м*), дециметровые (1 *м* — 10 *см*), сантиметровые (10—1 *см*) и миллиметровые (короче 1 *см*). Каждый из этих поддиапазонов находит свое применение в технике. Так, диапазон метровых волн используется для телевидения, частотномодулированного вещания, навигации, радиоастрономии, а в последнее время — для радиосвязи на сверхдальние расстояния. Диапазоны дециметровых и сантиметровых волн используются в телевидении, радиолокации и многоканальной связи. Диапазон миллиметровых волн только еще осваивается.

Радиолюбителям в настоящее время выделены для работы полосы частот во всех поддиапазонах: в метровом 38—40 и 144—146 *Мгц*; в дециметровом 420—425 и 1 470—1 520 *Мгц*; в сантиметровом 5 650—5 850 *Мгц*.

Прежде чем рассматривать особенности распространения каждого из поддиапазонов, остановимся на общих положениях, свойственных всему диапазону УКВ.

Любая линия связи состоит из трех основных частей: передающего устройства, приемного устройства и промежуточного звена — соединяющей их линии. В случае проводной связи роль линии выполняет воздушный провод или кабель. В случае радиолинии роль промежуточного звена выполняет среда, пространство, в котором распространяются радиоволны.

Наука о распространении радиоволн занимается изучением этого промежуточного звена, т. е. изучением свойств земной поверхности и атмосферы с точки зрения влияния их на распространение радиоволн. Задача исследователей и инженеров, работающих в области распространения радиоволн, заключается в изучении законов распространения радиоволн и изыскании способов выбора нужной длины волны, мощности передатчика и напряженности поля, необходимой для уверенного приема того или иного вида передач.

Особенностью науки о распространении радиоволн является большой круг охватываемых ею вопросов. В основном это вопросы радиотехники, но, кроме того, часто приходится обращаться к физике, геофизике и даже астрономии. В изучении распространения УКВ за последние годы выполнено много теоретических и экспериментальных работ. Большой вклад в это дело внесли советские ученые Б. А. Введенский, А. Г. Аренберг и В. А. Фок и др. Многие вопросы, однако, еще не решены и требуют дальнейшей сложной теоретической, а также длительной и обширной экспериментальной работы.

При рассмотрении распространения УКВ встречающиеся в практике случаи распространения удобно классифицировать следующим образом:

1. Распространение на небольшие расстояния (до 5—6 *км*), когда можно пренебречь сферичностью земли и считать ее плоской.

2. Распространение на расстояния, не превышающие пределов видимого горизонта (до 50—60 *км*).

3. Распространение на те же расстояния, но в гористой

местности или в большом городе, когда на пути распространения волны имеются значительные препятствия.

4. Тропосферное распространение радиоволн, т. е. распространение под влиянием нижних слоев атмосферы (до 200—600 *км*).

5. Ионосферное распространение радиоволн, вызываемое влиянием верхних ионизированных слоев атмосферы (свыше 1 000 *км*).

Прежде чем приступить к рассмотрению всех этих вопросов, следует напомнить об основных понятиях распространения радиоволн и кратко познакомиться с электрическими свойствами земной поверхности и атмосферы.

Настоящая брошюра ставит своей целью осветить физику явлений различных случаев распространения УКВ. В простейших случаях будут указаны способы расчета напряженности поля УКВ, которые радиолюбители могут использовать в своей практике. Кроме того, будут отмечены нерешенные еще вопросы распространения УКВ, в изучении которых могут помочь своими наблюдениями радиолюбители.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ О РАСПРОСТРАНЕНИИ РАДИОВОЛН

Прежде чем рассматривать особенности распространения УКВ, необходимо вспомнить основные понятия, соотношения и свойства радиоволн. Радиоволны представляют собой электромагнитные колебания. Важной характеристикой их является расстояние между двумя узлами или пучностями волны, называемое длиной волны и обозначаемое

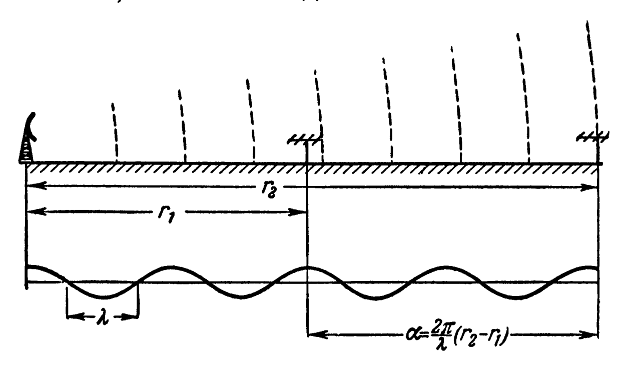


Рис. 1. К определению понятия о длине волны и разности фаз.

λ (рис. 1). Частота электромагнитных колебаний связана с длиной волны соотношением

$$\lambda=\frac{v}{f}, \tag{1}$$

где λ — длина волны;

f — частота колебаний;

v — скорость распространения волны.

Скорость распространения волн в пустоте равна скорости света $c\approx 300\cdot 10^6$ *м/сек*. При распространении в какой-либо другой среде скорость движения волны изменяется:

$$v = \frac{c}{n}, \qquad (2)$$

где n — коэффициент преломления среды.

В две точки, расположенные от передающей антенны на различных расстояниях в направлении движения волны, колебания приходят с запаздыванием во времени. Запаздывание во времени, характеризующееся отношением разности

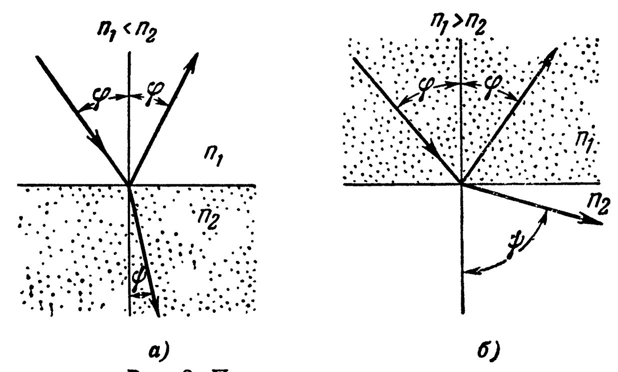


Рис. 2. Преломление радиоволн.

а — при переходе из менее плотной среды в более плотную; *б* — при переходе из более плотной среды в менее плотную.

расстояний к длине волны колебаний, называется разностью фаз колебаний (рис. 1):

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda}(r_2 - r_1). \qquad (3)$$

В однородной среде, т. е. среде, свойства которой не меняются по всему объему, волна движется прямолинейно с постоянной скоростью. При переходе волны из одной среды в другую на границе раздела двух сред происходит преломление и отражение волны. Волна частично проходит во вторую среду, причем направление ее движения меняется, а частично отражается от границы раздела (рис. 2). При этом угол падения равен углу отражения. Угол падения φ и угол преломления ψ связаны соотношением

$$\frac{\sin\varphi}{\sin\psi} = \frac{n_2}{n_1}, \qquad (4)$$

где n_1 и n_2 — коэффициенты преломления первой и второй сред.

В том случае, когда свойства среды (коэффициент преломления среды) плавно меняются, т. е. среда неоднородна, волна как бы непрерывно преломляется и движется по кри-

волинейной траектории (рис. 3). Чем более неоднородна среда, чем резче меняется коэффициент преломления, тем больше кривизна траектории. Явление искривления траектории волны в неоднородной среде называется рефракцией. В том случае, когда волна переходит из среды с бо́льшим коэффициентом преломления в среду с меньшим коэффи-

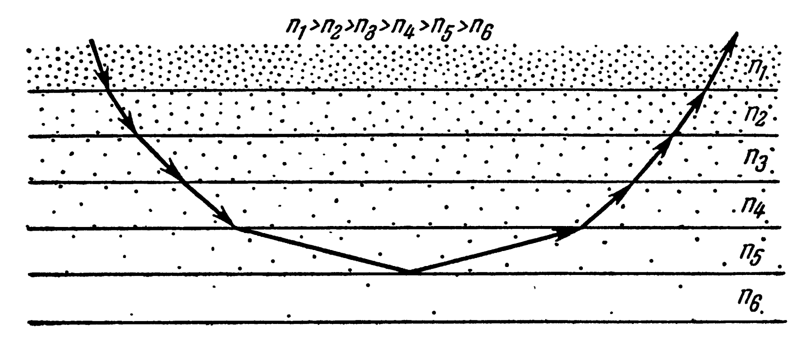


Рис. 3. Рефракция радиоволн в среде с меняющимся коэффициентом преломления.

циентом преломления (например, из воды в воздух), при достаточно большом угле падения может наступить явление полного внутреннего отражения, т. е. вся энергия волны отразится от границы раздела и не проникнет во вторую среду. Явление полного внутреннего отражения может иметь место и в неоднородной среде, когда коэффициент преломления среды уменьшается в направлении движения волны. При этом волна не проникнет дальше некоторого определенного расстояния (рис. 3).

Нередко в место приема приходит не одна, а две или несколько волн одной и той же частоты. Волны эти могут иметь различные фазы, если они пришли от разных источников или от одного источника различными путями. Явление наложения волн одинаковой частоты, но разной фазы называется интерференцией. В зависимости от разности фаз результирующее поле может оказаться либо больше, либо меньше полей отдельных волн.

На рис. 4 показаны два случая интерференции волн. В точке *Б* складываются волны, пришедшие по пути *АБ* и и $АВ_1Б$ или $АВ_2Б$. В первом случае разница в длинах путей двух волн составляет целое число полуволн ($\alpha = 180°$), и напряженности полей вычитаются, во втором случае — целое число длин волн, и поля складываются.

Если на пути распространения волн встречается непрозрачное препятствие, то волна стремится обогнуть его. Явление огибания волной встречающихся на пути препятствий называется дифракцией.

Дифракция наиболее сильно проявляется в том случае, когда размеры препятствия того же порядка, что и длина

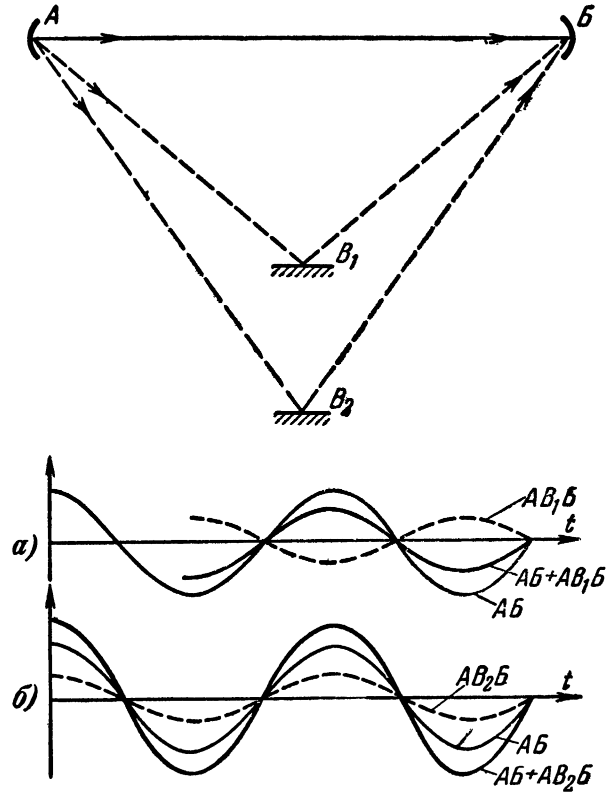


Рис. 4. Интерференция двух волн, пришедших различными путями.

а — длина пути $AB_1Б$ больше пути $АБ$ на целое число полуволн; *б* — длина пути $AB_2Б$ больше пути $АБ$ на целое число волн.

волны. Если препятствие очень мало по сравнению с длиной волны, то дифракция сказывается так сильно, что на интенсивность поля(за препятствием) оно не влияет. При больших размерах препятствия волны практически не огибают его и за ним образуется область тени.

Интенсивность радиоволн (электромагнитных колебаний) можно характеризовать напряженностью электрического или магнитного поля, которые связаны между собой определенным соотношением. Обычно измеряют напряженность электрического поля, так как это практически удобнее. Напряженность электрического поля измеряется в вольтах на метр (*в/м*), милливольтах на метр (*мв/м*) или микровольтах на метр (*мкв/м*). 1 *мкв/м* $=10^{-3}$ *мв/м* $=10^{-6}$ *в/м*.

Часто напряженность поля измеряется в относительных логарифмических единицах — децибелах (*дб*):

1 *дб* $=20 \lg E/E_0$.

Обычно принимают $E_0=1$ *мкв/м* или 1 *мв/м*.

Представим себе антенну, помещенную в однородную среду и одинаково излучающую во все стороны. Такая антенна называется ненаправленной. В любом направлении на одном и том же расстоянии от такой антенны напряженность поля одинакова и имеет одинаковую фазу. Поверхность, на которой фазы волны одинаковы, называется фронтом волны. В данном случае фронт волны представляет собой сферу. Такие волны называются сферическими. В диапазоне УКВ применяются большей частью направленные антенны, которые дают возможность сосредоточить излучаемую энергию в определенном направлении. Волна в этом случае тоже сферическая, так как ее фронт представляет собой некоторую часть сферической поверхности. Степень концентрации излучения антенны в желаемом направлении характеризуется коэффициентом направленного действия антенны, обозначаемым D. Направленная антенна, излучающая мощность P, создает такую же напряженность поля в месте приема, как ненаправленная антенна, излучающая мощность PD.

Не вся мощность, подводимая от передатчика к антенне, излучается. Отношение мощности, излученной антенной, к мощности, подведенной к ней, называется коэффициентом полезного действия (к. п. д.) антенны. Произведение к. п. д. антенны на ее коэффициент направленного действия называется коэффициентом усиления антенны. Коэффициент усиления антенн сантиметровых волн может достигать больших значений. Для антенны типа «волновой канал» коэффициент усиления лежит в пределах 5—20, для параболической антенны он достигает 10^4—10^5.

Зная излучаемую мощность P (в киловаттах), коэффициент направленности действия антенны D и расстояние до точки приема r (в километрах), можно подсчитать эф-

фективное значение напряженности поля (в милливольтах на метр):

$$E = 173 \frac{\sqrt{PD}}{r}. \qquad (5)$$

Напряженность поля обратно пропорциональна расстоянию.

Небольшие участки сферического фронта волны можно приближенно считать плоскими. В этом смысле говорят о плоских волнах. Понятие о плоских волнах упрощает рассмотрение многих вопросов распространения радиоволн.

ГЛАВА ВТОРАЯ

СТРОЕНИЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ И АТМОСФЕРЫ

Средой, в которой распространяются радиоволны, являются атмосфера и земная поверхность. Радиоволны могут распространяться в атмосфере непосредственно вблизи земной поверхности. В этом случае на их распространение большое влияние оказывают свойства земной поверхности и нижних слоев атмосферы.

Волны также могут распространяться путем отражения от верхних ионизированных слоев атмосферы. В этом случае условия распространения зависят главным образом от состояния ионизированных слоев атмосферы. С точки зрения распространения радиоволн в атмосфере следует различать две области: нижний слой атмосферы, непосредственно прилегающий к поверхности земли и простирающийся до 10—14 *км*, названный тропосферой, и верхние ионизированные слои, расположенные на высоте от 60 до 400—600 *км*, названные ионосферой.

Земная поверхность

Установить свойства земной поверхности довольно сложно, так как почва неоднородна по своему составу. Электрические свойства сухой и влажной почв различны, так же различаются свойства пресной и морской воды. Однако для УКВ все виды земной поверхности, кроме поверхности моря, можно считать почти идеальным диэлектриком. Это упрощает рассмотрение многих вопросов. Но в диапазоне УКВ возникает другая сложность: даже небольшие неровности поверхности оказывают существенное влияние на распространение.

При падении радиоволн на неровную земную поверхность получается рассеянное отражение, причем напряженность поля отраженной волны ослабляется по сравнению со случаем отражения от гладкой поверхности. Отражения от земли носят рассеянный характер в тех случаях, когда высота неровности h больше некоторой величины, зависящей от длины волны λ и угла падения волны на поверхность φ:

$$h > \frac{\lambda}{8 \cos \varphi}. \qquad (6)$$

Для скользящих лучей рассеяние вызывается более высокими неровностями, чем для отвесно падающих лучей.

Понятие «неровность поверхности» различно для различных длин волн: для метровых волн неровностями являются холмы, здания, деревья; для волн длиной 3—10 *см* даже травяной покров и небольшие бугры уже являются неровностью.

Таким образом, условия отражения УКВ от земной поверхности определяются главным образом неровностями земли, а не ее электрическими параметрами.

Тропосфера

В пределах тропосферы воздух имеет такой же состав, как и у земной поверхности, т. е. состоит главным образом из азота (78% по объему) и кислорода (21% по объему). Состояние воздуха в тропосфере характеризуется его давлением, температурой и влажностью. С повышением над земной поверхностью плотность воздуха уменьшается; обычно уменьшаются также влажность и температура, так как в пределах тропосферы воздух нагревается за счет излучения тепла земной поверхностью.

Параметры тропосферы меняются в зависимости от времени года, суток и метеорологических условий. Наблюдения за изменениями метеорологических условий ведутся на метеорологических станциях как в приземном слое, так и на высоте. Для этого измерительные приборы поднимают на воздушных шарах или самолетах. Измерения проводят через небольшие интервалы по высоте, что дает возможность подробно исследовать строение тропосферы.

Коэффициент преломления воздуха обычно считают равным единице. Но это справедливо только в первом приближении. В действительности коэффициент преломления тропосферы зависит от давления, температуры и влажности

воздуха и, хотя и незначительно, отличается от единицы. При нормальных давлении, влажности и температуре коэффициент преломления превышает единицу примерно на $4 \cdot 10^{-4}$. Зависимость коэффициента преломления от давления воздуха p, температуры T и давления водяного пара (абсолютной влажности) p' определяется формулой, коэффициенты в которой были найдены опытным путем:

$$(n-1)\,10^6 = \frac{78,5}{T}\left(p + \frac{4800}{T}\,p'\right), \tag{7}$$

где n — коэффициент преломления воздуха — величина безразмерная;

T — абсолютная температура ($T = 273 + t°$ C);

p и p' — давления, *мбар*.

Коэффициент преломления непостоянен по высоте и в общем с повышением над земной поверхностью уменьшается, стремясь к единице. Поэтому нижние слои атмосферы являются неоднородной средой, причем параметры ее меняются в зависимости от времени суток, года и погоды. Неоднородности изменения коэффициента преломления атмосферы существенны до высоты примерно 10 *км*. Уже на этой высоте значение $(n-1) = 109 \cdot 10^{-6}$ и постоянно на всем земном шаре. Как видно из приведенных цифр, абсолютная величина коэффициента преломления атмосферы изменяется мало.

На распространение радиоволн оказывает влияние не абсолютная величина коэффициента преломления, а закон его изменения с высотой. Многочисленные наблюдения показали, что в средних широтах среднее состояние атмосферы характеризуется равномерным изменением ее коэффициента преломления с высотой. Атмосфера, в которой коэффициент преломления уменьшается на $4 \cdot 10^{-8}$ на каждый метр изменения высоты, называется «стандартной атмосферой».

Закон изменения коэффициента преломления тропосферы с высокой часто сильно отличается от линейного. Бывают случаи, когда коэффициент преломления сначала убывает с высотой, затем с некоторого уровня начинает возрастать и затем снова убывает. Иногда коэффициент преломления возрастает от земной поверхности до высоты в несколько десятков метров, а затем начинает уменьшаться. Неоднородность атмосферы в вертикальном направлении приводит к искривлению траектории волны, т. е. рефракции. Следовательно, всякое изменение метеорологических условий, погоды скажется на законе распространения УКВ.

Тропосфера неоднородна и в горизонтальном направлении. В ней имеются местные неоднородности, причиной появления которых является турбулентное движение воздуха в атмосфере, т. е. движение с завихрениями. Отдельные участки земной поверхности нагреваются различно. От этого в тропосфере появляются восходящие и нисходящие воздушные потоки, и в отдельных участках плотность воздуха оказывается больше или меньше. Следовательно, в отдельных точках атмосферы коэффициент преломления может заметно отличаться от среднего значения. Объемные неоднородности тропосферы оказывают большое влияние на распространение УКВ, вызывая рассеяние радиоволн.

Энергия радиоволн рассеивается также капельками воды и частицами льда, содержащимися в атмосфере. Это позволяет обнаруживать области выпадения дождя, а также грозовые облака при помощи радиолокационных станций, работающих на сантиметровых волнах. Полученные таким образом сведения служат для определения движения грозовых облаков и штормов и используются в аэронавигации.

Проводимость воздуха очень мала, поэтому при распространении в тропосфере радиоволны длиннее 30 *см* практически не испытывают поглощения. Более короткие волны поглощаются в капельках воды. Поле радиоволн высокой частоты наводит в капельках воды токи смещения, а за счет проводимости воды возникают потери, т. е. поглощение радиоволн. Сантиметровые и миллиметровые волны воздействуют на молекулы газов и претерпевают резонансное поглощение. Так, волны длиной 1,3 *см* поглощаются парами воды, волны длиной 0,5 *см* — кислородом воздуха.

Ионосфера

До недавнего времени считалось, что влияние ионосферы на распространение УКВ несущественно. Но исследования, проведенные в последние годы, показали, что влияние ионосферы делает возможной регулярную связь на метровых волнах на сверхдальние расстояния.

Остановимся кратко на свойствах ионосферы, важных для распространения УКВ. Наиболее важным свойством ионосферы является то, что в этой области газы, входящие в состав атмосферы, ионизированы. Процесс ионизации заключается в том, что под действием ультрафиолетовых солнечных лучей и частиц, летящих с Солнца, нейтральные атомы и молекулы газа расщепляются на положительно заряженные ионы и отрицательно заряженные электроны.

Степень ионизации характеризуется электронной плотностью, т. е. количеством электронов в 1 *см*³ газа. Наличие свободных электронов в газе приводит к изменению диэлектрической проницаемости, а следовательно, и его преломляющих свойств. Кроме того, при одной и той же электронной плотности волны различных частот преломляются неодинаково.

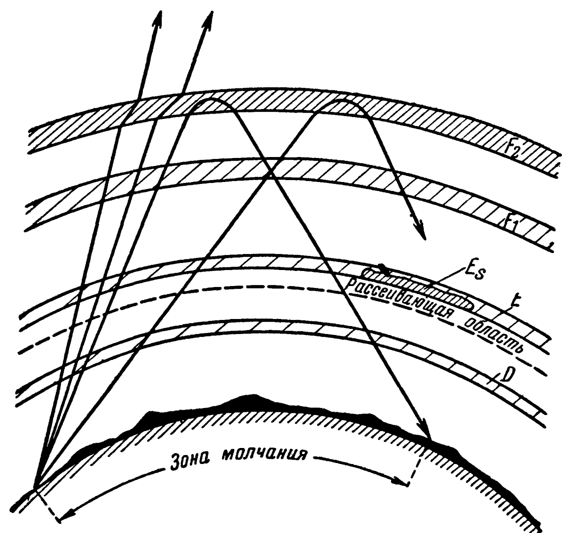


Рис. 5. Схема расположения ионосферных слоев и образование зоны молчания.

Коэффициент преломления ионизированного газа определяется следующей простой формулой:

$$n = 1 - 80{,}8 \cdot 10^{-6} \frac{N}{f^2}, \qquad (8)$$

где N — количество электронов в 1 *см*³ газа;
f — рабочая частота, *Мгц*.

Из формулы видно, что коэффициент преломления ионизированного газа всегда меньше единицы, следовательно меньше коэффициента преломления воздуха.

Электронная плотность меняется по высоте ионосферы, так что ионосфера является неоднородной средой. При этом электронная плотность меняется не плавно, а имеет несколько максимумов, называемых слоями. Различают четыре регулярных ионосферных слоя: слой D на высоте 60—80 *км*, слой E на высоте 100—120 *км*, слой F_1 на высоте 200—250 *км* и слой F_2 на высоте 300—400 *км* (рис. 5).

Более высокие слои имеют бóльшую электронную плотность. Электронная плотность слоев меняется в зависимости от высоты Солнца, а следовательно, от времени суток и года. Наибольшая плотность наблюдается в полдень и для всех слоев, кроме слоя F_2, летом. Слой F_2 имеет наибольшую плотность в полдень зимой. Кроме того, электронная плотность слоев, особенно слоя F_2, меняется от года к году в соответствии с циклами солнечной активности. Дело в том, что, как показали наблюдения, проводившиеся в течение многих лет, активность Солнца периодически меняется, причем этот период составляет примерно 11 лет. С древнейших времен астрономы наблюдали появление на поверхности Солнца темных образований, названных «солнечными пятнами», которые долгое время служили критерием активности Солнца. Позднее было установлено, что чем больше площадь, занимаемая солнечными пятнами, тем интенсивнее ультрафиолетовое излучение Солнца, а следовательно, и ионизирующая способность этого излучения. Таким образом, в годы, когда число солнечных пятен велико (годы максимума солнечной деятельности), плотность ионизации ионосферных слоев значительно увеличивается.

Кроме регулярных слоёв в ионосфере время от времени на высоте 90—110 *км* образуется нерегулярный (спорадический) слой E_s. Спорадический слой представляет собой скопление ионизированного газа гораздо большей электронной плотности, чем плотность на той же высоте в окружающей среде. Этот слой появляется над сравнительно небольшой территорией (примерно 100×100 *км*) и может перемещаться под действием господствующих в ионосфере ветров в каком-либо направлении. Скорость перемещения этого слоя равна примерно 150—250 *км/ч*.

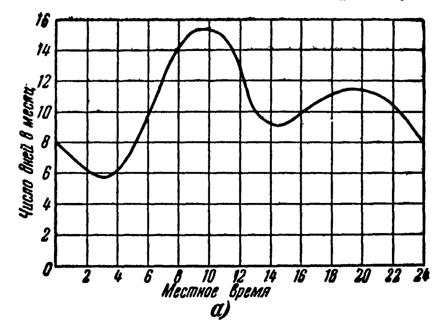
Спорадический слой чаще всего появляется в дневные часы летом в южных широтах. Так, в экваториальной зоне в дневное время он присутствует почти все время, а в средних широтах в дневное время летом — 50—70% времени, т. е. 15—20 дней в месяц. Иногда спорадический слой существует несколько часов, а иногда только несколько минут. Зимой в средних широтах слой E_s появляется редко.

Изменение частоты появления слоя E_s в зависимости от времени суток (в летние месяцы) и времени года в дневные часы показано на рис. 6.

Частота появления и электронная плотность спорадического слоя не зависят от 11-летнего цикла солнечной активности. Причины образования спорадического слоя еще не

установлены, поэтому не удается предсказать время его появления и продолжительность существования. Этот слой играет важную роль в сверхдальнем распространении УКВ.

Радиоволны отражаются от ионизированных слоев. Ионизированный слой представляет собой неоднородную среду с убывающим по высоте коэффициентом преломления. В этом случае возможно явление полного внутреннего отражения. При этом для отражения более длинных волн нужна меньшая электронная плотность газа. Для слоя определенной электронной плотности существует некоторое критическое значение частоты, выше которой волны не отражаются, а проходят, преломляясь сквозь слой. Кроме того, для данной частоты существует некоторое критическое значение угла возвышения луча, т. е. при данных электронной плотности и частоте волны могут отразиться только при передаче на расстояние не ближе некоторого минимального, называемого «зоной молчания» (см. рис. 5).



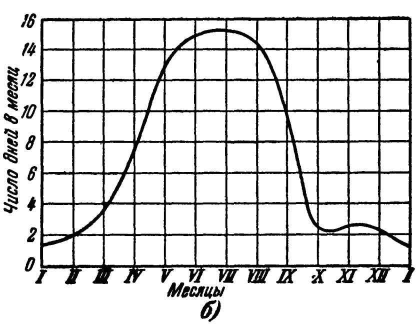


Рис. 6. Число дней в месяце, когда присутствует слой E_s (в средних широтах).

а — зависимость от времени суток (летом)
б — зависимость от времени года (дневные часы).

Как установлено в последнее время, ионосферные слои неоднородны по своей структуре. Они представляют собой как бы скопление облаков ионизированного газа. Местами электронная плотность газа больше, местами — меньше. Размеры этих облаков оцениваются в 50—100 *м*. Поэтому и обнаружить их можно только на коротких и метровых волнах. Облака ионизированного газа непрерывно образуются, рассасываются и находятся в хаотическом движении. Наиболее отчетливо наличие таких неоднородностей выражено на высотах 70—80 *км*.

Радиоволны рассеиваются от неоднородностей ионосфер-

ных слоев примерно так же, как от неровностей поверхности Земли. При этом рассеянное отражение направлено во все стороны, но главным образом в направлении первоначального движения волны.

Неоднородная структура ионосферы еще мало исследована. В настоящее время в этом направлении ведутся работы, имеющие большое практическое значение. Использование явления рассеяния на неоднородностях ионосферных слоев открыло новые широкие возможности применения УКВ.

Кратковременная ионизация атмосферы происходит также при вторжении в нее метеоров. Обладающие большими скоростями (13—70 *км/сек*) относительно Земли метеорные тела проникают в земную атмосферу, где сталкиваются с молекулами воздуха. В результате этих столкновений происходит ионизация воздуха.

При движении метеорных тел в земной атмосфере за ними образуется след в виде столба ионизированного воздуха. Значительную ионизацию уже могут создавать метеорные тела весом в несколько граммов. Ионизованный след имеет форму цилиндра длиной в несколько десятков километров. Первоначально диаметр цилиндра невелик, но затем он начинает рассасываться, диаметр его увеличивается, а плотность ионизации уменьшается. При еще достаточно высокой плотности ионизации диаметр ионизированного столба может достигать десятков и сотен метров.

Радиолокационные установки позволяют наблюдать примерно в 100 раз больше метеоров, чем это удается сделать опытному наблюдателю невооруженным глазом. При этом наблюдение метеоров возможно не только ночью, но и днем, а также в пасмурную погоду.

От области полярных сияний также возможно отражение метровых волн.

Полярные сияния являются следствием ионизации атмосферы частицами, извергаемыми активными областями Солнца. Эти сияния возникают на высоте от 80—90 до 1 000 *км* над земной поверхностью.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

РАСПРОСТРАНЕНИЕ УКВ В ПРЕДЕЛАХ ВИДИМОГО ГОРИЗОНТА

До последнего времени УКВ применялись для передачи на сравнительно небольшие расстояния — в пределах прямой видимости. За этим пределом напряженность поля УКВ

резко уменьшается, так как дифракция в этом диапазоне сказывается значительно слабее, чем на более длинных волнах, и УКВ распространяются почти прямолинейно. Для увеличения дальности действия передач на УКВ антенны поднимают возможно выше над землей. Зная высоту, на которую подняты передающие и приемные антенны, можно из простых геометрических соображений легко определить расстояние прямой видимости (рис. 7).

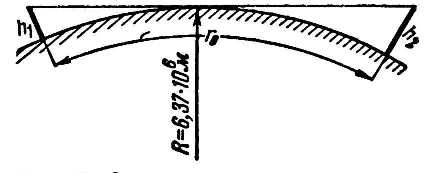


Рис. 7. Определение расстояния прямой видимости.

Без учета рефракции эта дальность, т. е. расстояние прямой видимости (в километрах) может быть вычислена по формуле

$$r_0 = \sqrt{2R}\,(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) = 3{,}57\,(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}), \qquad (9)$$

где R — радиус земного шара ($6{,}37 \cdot 10^6$ *м*);
h_1 — высота передающей антенны, *м*;
h_2 — высота приемной антенны, *м*.

Практически r_0 составляет около 40—50 *км*.

Расстояния, много меньшие дальности прямой видимости

Первые исследования в области УКВ были направлены на выяснение условий их распространения в пределах прямой видимости на небольшие расстояния при открытой трассе, когда поверхность земли можно считать плоской и когда на пути распространения волн нет гор, больших зданий и других существенных препятствий.

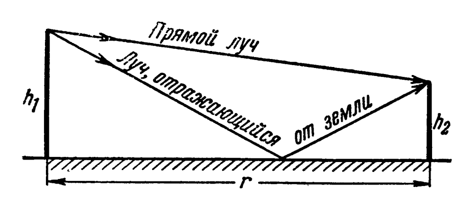


Рис. 8. Схема распространения УКВ на небольшие расстояния.

Впервые ответ на вопрос, как рассчитать напряженность поля УКВ и отчего она зависит, дал в 1922 г. Б. А. Введенский. Первые опыты проводились им на волне длиной 3,8 *м* на расстоянии в десятки метров. Б. А. Введенский показал, что на небольших расстояниях в любой точке поле складывается из двух волн: прямой и отраженной от земной

поверхности. Даже если применяются остронаправленные антенны, имеет место волна, отраженная от земли (рис. 8).

В зависимости от того, насколько различаются длины путей прямого и отраженного лучей, результирующее поле может оказаться больше или меньше поля каждой из составляющих. При небольших высотах антенны по сравнению с длиной трассы (этот случай обычно имеет место на практике) фаза волны при отражении от земной поверхности

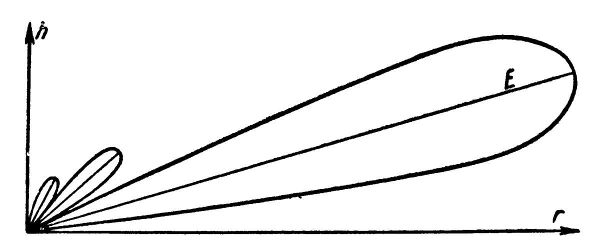


Рис. 9. Лепестковая диаграмма направленности, получающаяся в результате интерференции прямого и отраженного лучей.

меняется на 180°. Таким образом, если разность длин путей прямого и отраженного лучей мала (меньше полуволны) или составляет целое число волн, поля вычитаются. Если же разность путей составляет целое число полуволн, то поля складываются.

Поле имеет в этом случае интерференционный характер. Напряженность поля убывает с увеличением расстояния или высоты над земной поверхностью не плавно, а то увеличиваясь, то уменьшаясь. В результате характеристика направленности в вертикальной плоскости носит лепестковый характер (рис. 9).

Из рис. 9 видно, что если приемную антенну поднимать выше уровня максимального излучения первого лепестка, то напряженность поля начнет уменьшаться с поднятием антенны над земной поверхностью. Поднимать антенну выше, чем $h_{2макс}$ нецелесообразно.

$$h_{2\,макс} = \frac{\lambda}{4} \cdot \frac{r}{h_1}, \tag{10}$$

Для расчета напряженности поля УКВ в том случае, когда приемная антенна расположена не на слишком большой высоте, так что она облучается нижней частью первого лепестка интерференционной диаграммы, Б. А. Введенский

предложил простую формулу, называемую отражательной:

$$E = \frac{2,18\sqrt{PDh_1h_2}}{r^2\lambda}, \qquad (11)$$

где E — действующее значение напряженности поля в месте приема, *мв/м*;

P — мощность, излучаемая антенной, *квт*;

D — коэффициент направленного действия антенны по сравнению с ненаправленным излучателем (величина безразмерная);

h_1 и h_2 — высоты передающей и приемной антенн, *м*;

r — расстояние вдоль земной поверхности, *км*;

λ — длина рабочей волны, *м*.

Формула (11) является основной для расчетов ультракоротковолновых линий связи и размещения вещательных станций. Она дает наглядную зависимость напряженности поля от длины волны, высот антенн и расстояния. Из этой формулы видно, что для увеличения напряженности поля следует выше поднимать передающую и приемную антенны. Напряженность поля тем больше, чем короче волна. Напряженность поля с увеличением расстояния убывает по квадратичному закону.

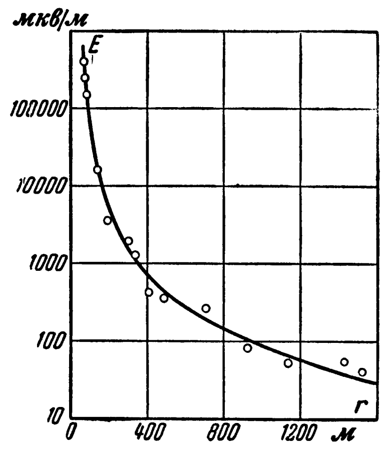


Рис. 10. Сопоставление расчетных значений напряженности поля с измерениями, проводившимися на ровной местности.

Необходимо отметить, что формула (11) справедлива только для случая, когда антенны подняты достаточно высоко. Легко видеть, что если одна из антенн расположена на земной поверхности, т. е. h_1 или h_2 равно нулю, то напряженность поля равна нулю, что не соответствует действительности. Для этого случая формула (11) неприменима.

Эта формула неприменима также для очень больших высот поднятия антенн. Применимость ее в этом случае ограничена условием

$$h_2 \leq \frac{r\lambda}{18h_1}. \qquad (12)$$

Экспериментальная проверка справедливости формулы (11) производилась измерением напряженности поля вдоль пути распространения волн. На рис. 10 приведены результаты измерений напряженности поля в сопоставлении с расчетной кривой. Измерения проводились над ровной местностью на волне длиной 7,25 *м*. Высоты передающей и приемной антенн были соответственно 29 и 3,1 *м*. Результаты измерений отмечены точками. Линией нанесены результаты расчетов по формуле (11). Как видно, расхождение между экспериментом и расчетом невелико.

Расстояния, близкие к пределу прямой видимости

При увеличении расстояния нельзя пренебрегать влиянием кривизны земной поверхности. На рис. 11 изображена схема распространения УКВ для расстояний, при которых необходимо уже учитывать сферичность Земли.

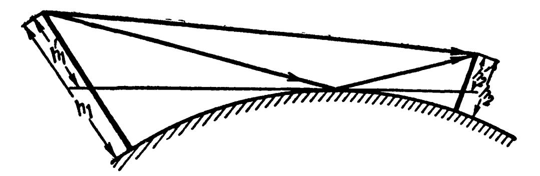


Рис. 11. Схема распространения УКВ на расстояния, при которых необходим учет сферичности земной поверхности.

Из схемы видно, что если в точке отражения радиоволн от земной поверхности провести плоскость, касательную к земному шару, и отсчитывать высоты антенн от этой плоскости, а не от поверхности земли, то получим ту же схему распространения волн, что и в случае плоской земли. Разность хода лучей определится таким же образом, как и раньше. Следовательно, для определения напряженности поля в этом случае в формулу (11) вместо действительных высот антенн h_1 и h_2 следует подставлять так называемые приведенные высоты h_1' и h_2', равные расстоянию от точки подвеса антенны до плоскости, касательной в точке отражения. Величины приведенных высот (в метрах) определяются из геометрических соображений.

При расчете напряженности поля по формуле (11) предполагалось, что лучи идут прямолинейно. В действительности под влиянием рефракции траектория луча становится

криволинейной, что затрудняет вычисление разности прямого и отраженного луча.

Так как эта формула проста и наглядна и применимость ее хорошо проверена опытом, то оказалось целесообразным ввести в нее некоторые дополнения для учета явления рефракции, существенно не меняя самой формулы. Было введено понятие эквивалентного радиуса земного шара, которое позволило приближенно учесть явление атмосферной рефракции.

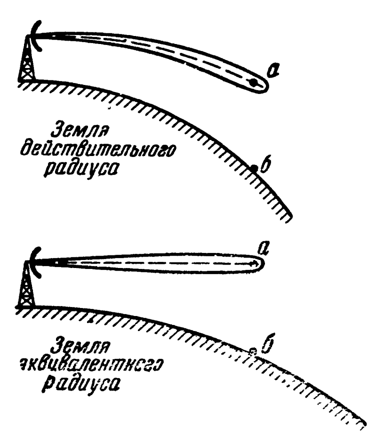


Рис. 12. Учет влияния рефракции путем замены действительного радиуса Земли эквивалентным.

На рис. 12 изображены сферическая поверхность земли и расположенная над ней антенна. Излученная волна распространяется по некоторой кривой и в точке приема находится на расстоянии *аб* от земной поверхности. Представим себе, что волна распространяется не по кривой линии, а по прямой. Для того, чтобы она проходила при этом на той же высоте над земной поверхностью, нужно, чтобы изменился радиус земного шара, т. е. действительный радиус земного шара заменить эквивалентным.

Из геометрических соображений можно найти зависимость между кривизной траектории и эквивалентным радиусом земного шара. Кривизна траектории зависит от того, насколько изменяется коэффициент преломления атмосферы при подъеме на единицу высоты, например 1 *м*. Следовательно, от изменения коэффициента преломления атмосферы с высотой зависит и эквивалентный радиус земного шара R'. Если траектория луча в атмосфере обращена выпуклостью вверх, т. е. луч возвращается на землю, то эквивалентный радиус земного шара оказывается больше действительного радиуса. Кажущееся увеличение радиуса земного шара учитывается коэффициентом k:

$$k = \frac{R'}{R}. \qquad (13)$$

Коэффициент k следующим образом связан с коэффициентом преломления атмосферы:

$$k = \frac{1}{1 - 6,37 \cdot 10^6 \Delta n}, \qquad (14)$$

где Δn — изменение коэффициента преломления атмосферы при поднятии на 1 *м*.

Понятие эквивалентного радиуса применимо не только тогда, когда коэффициент преломления изменяется по высоте линейно, независимо от рассматриваемой высоты, т. е. Δn — величина постоянная для всех высот. Понятие эквивалентного радиуса земного шара дает усредненные величины и фактически применяется успешно даже при отклонении закона изменения коэффициента преломления с высотой от линейного.

В формуле (11) увеличение радиуса кривизны земной поверхности учитывается в изменении приведенных высот антенны. При этом, как видно из рис. 11, приведенная высота увеличивается, а следовательно, увеличивается и напряженность поля в точке приема. В случае стандартной атмосферной рефракции, когда $\Delta n = 4 \cdot 10^{-8}$ *м*, эквивалентный радиус земного шара в $k = 4/3$ раза больше действительного радиуса. В расчетах обычно и принимают эту величину k, если только специальные измерения не показали, что коэффициент преломления атмосферы изменяется с высотой как-то иначе.

Увеличение напряженности поля на расстояниях, близких к пределу прямой видимости, наблюдается в действительности. Учет влияния рефракции описанным выше образом дает хорошее совпадение с опытными данными.

Наблюдения за распространением УКВ показывают, что напряженность поля в точке приема непостоянна. Напряженность поля меняется в зависимости от времени года, времени суток, ото дня ко дню. Кроме таких длительных келебаний, наблюдаются быстрые колебания в несколько секунд или несколько минут. Эти колебания называются замираниями.

Медленные колебания напряженности поля вызываются изменениями метеорологических условий. Меняются условия рефракции, кривизна траектории луча, а следовательно, и разность фаз прямой и отраженной волн. Быстрые колебания вызываются флуктуацией преломляющих свойств атмосферы. Под действием местного нагрева и движений в тропосфере преломляющие свойства атмосферы меняются — флуктуируют.

При распространении в пределах прямой видимости напряженность поля достаточно велика и меняется слабо.

В основном наблюдаются медленные изменения напряженности поля. Для борьбы с ними достаточно применения системы АРУ.

Влияние неровностей земной поверхности

Рассмотренные выше теоретические формулы дают хорошее согласие с опытом в том случае, когда земную поверхность можно рассматривать как гладкую сферу. Если на пути распространения волны имеется одно явно выраженное препятствие — холм или высокое здание, то напряженность поля можно оценить, проведя расчет согласно дифракционной теории.

Приближенно напряженность дифракционного поля за препятствием можно вычислить по формуле, предложенной А. Н. Щукиным:

$$E = E_0 F, \qquad (15)$$

где E_0 — напряженность поля в свободном пространстве, определяемая по формуле (5);

F — множитель ослабления, для определения которого можно воспользоваться графиком рис. 13.

Параметр u зависит от высоты препятствия Z, расстояния от передатчика до препятствия r_1 и от препятствия до приемника r_2, а также от длины волны λ:

$$u = Z\sqrt{\frac{2(r_1 + r_2)}{r_1 r_2 \lambda}}. \qquad (16)$$

В реальных условиях на пути распространения волны встречается много препятствий, различных по размерам и не имеющих строгой геометрической формы: холмы, деревья, постройки и т. д. В этом случае расчет напряженности поля с учетом влияния всех этих препятствий и неровностей практически невозможен. Когда, например, проектируют размещение УКВ вещательной или телевизионной станции, то теоретический расчет может дать только ориентировочное суждение о распределении напряженности поля на окружающей местности. Точное суждение можно получить, только измерив напряженность поля на местности.

Для выбора места расположения передатчика и оценки напряженности поля предварительно проводят измерения при помощи опытного передатчика, работающего на той же волне, что и действительный, но имеющего значительно меньшую мощность. Такие опыты проводились, например,

в Англии. В этих опытах, кроме конкретных результатов — определения распределения напряженности поля заданной длины волны в данной местности, получены интересные общие закономерности. Поэтому опишем эти опыты более подробно.

Измерения проводились на волнах около 2 и 0,5 *м* (частоты 102,6 и 593,6 *Мгц*). Мощность передатчика была

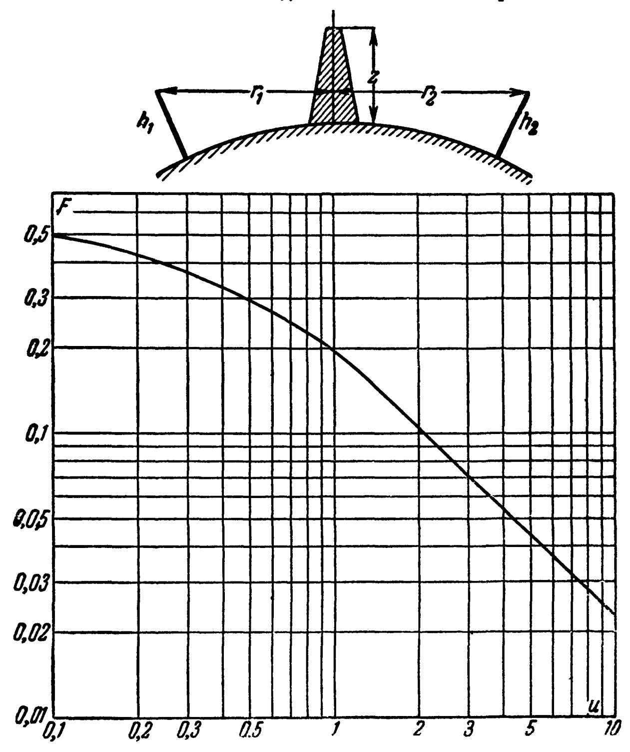


Рис. 13. График для определения множителя ослабления напряженности поля за препятствием.

около 100 *вт*. Измерения были выполнены по девяти радиальным направлениям вокруг передатчика на расстоянии до 70 *км* через каждые 8 *км*. Результаты измерений сильно зависели от выбора места расположения приемной антенны. Если антенна находилась на открытом месте, то отклонения в отдельных измерениях составляли 2—3 *дб*. Среди высоких деревьев случайные отклонения величин напряженности поля от среднего значения доходила до 20 *дб*. При этом на более короткой волне они были значительнее.

Напряженность поля сильно зависит от профиля местности. На рис. 14 изображен профиль местности по одному из направлений, на которых велись измерения, и на графике нанесены точки измеренной напряженности поля. В начале трассы, где местность ровная, напряженность поля убывает плавно. Затем местность повышается до холма. На этом участке пути напряженность поля увеличивается с удалени-

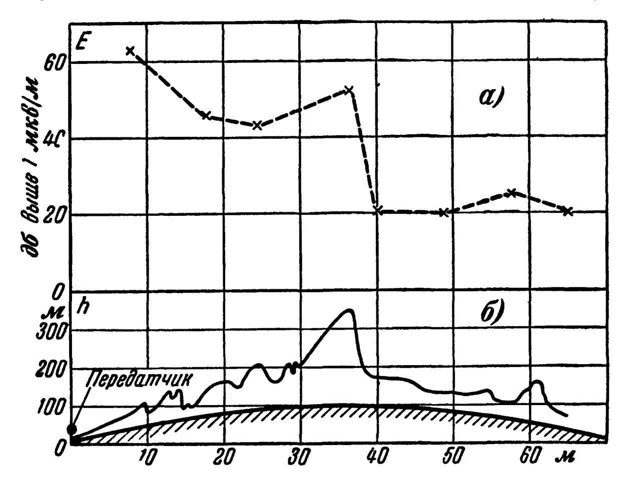


Рис. 14. Результаты измерения напряженности поля на волне с частотой 593,6 *Мгц* на неровной местности.

а — напряженность поля; *б* — профиль трассы.

ем от передатчика. За холмом напряженность поля резко убывает. Это — область тени. Дальше местность ровная. Интересно, что на этом участке пути напряженность поля не уменьшается с увеличением расстояния, а на протяжении почти 20 *км* остается постоянной. Это явление объясняется тем, что вершина холма служит как бы естественным ретранслятором. На земную поверхность за холмом приходят два луча: один — прямой с вершины холма и второй — отраженный от земли между холмом и приемником. При благоприятном соотношении фаз прямого и отраженного лучей напряженность поля увеличивается, что в данном случае привело к компенсации уменьшения напряженности поля с расстоянием.

Наблюдались случаи, когда напряженность поля за препятствием увеличивалась с увеличением расстояния на некотором отрезке пути.

В измерениях было обнаружено также, что на радиальных направлениях, проходящих через сильно застроенные районы города (Лондона), напряженность поля была в общем ниже, чем по другим направлениям на тех же расстояниях. Особенно сильно это сказывалось на волне 0,5 *м*. Разница доходила до 15—20 *дб*.

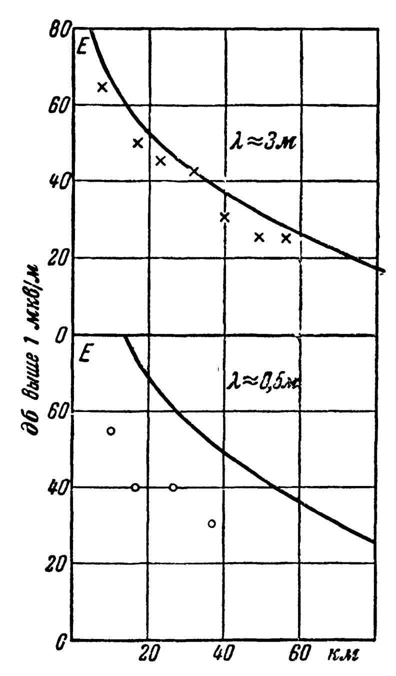


Рис. 15. Сопоставление расчетных значений напряженности поля с измерениями, проводившимися на неровной местности.

Когда поверхность земли неровная или антенна размещается над сильно застроенным районом, возникает вопрос: от какого уровня отсчитывать высоту антенны при расчете напряженности поля?

Как видно из формулы (11), расчетное значение напряженности поля сильно зависит от того, какое значение высоты антенны будет выбрано. Это всегда необходимо установить. Расхождения могут получиться именно из-за неправильного определения высоты антенны. Некоторые исследователи полагают, что в случае пересеченной местности за высоту антенны следует принимать ее возвышение над средним уровнем, подсчитанным на расстоянии 3—10 *км* от антенны. Другие считают, что более правильно принимать действительную высоту антенны.

На рис. 15 проведено сопоставление расчетной кривой с точками, полученными из опыта. На волне 3 *м* измеренные значения отличаются от расчетных не более чем на 6 *дб*. На волне 0,5 *м* разница значительно больше; она достигает 20—30 *дб*. На этих графиках нанесены средние по всем направлениям значения, что исключает влияние специфики данной трассы. Проведенные измерения показали, что чем выше частота, тем больше расхождение эксперимента с расчетом и тем ниже измеренная напряженность поля по

сравнению с рассчитанной. Такие же результаты были получены и другими исследователями.

Путем обобщения результатов многих наблюдений была получена эмпирическая формула, дающая возможность рассчитать поправку на неровность почвы. С повышением частоты разность между теоретическим и экспериментальным значениями напряженности поля, выраженная в децибелах, увеличивается пропорционально частоте. Это увеличение при расстояниях в пределах прямой видимости, грубо говоря, не зависит от расстояния до передатчика и высоты подъема антенны. Путем экстраполяции экспериментальных значений получена формула для определения среднего значения напряженности поля при пересеченной местности для диапазона частот 50—1 000 *Мгц*:

$$20 \lg E/E_0 = 37 - 20 \lg f, \qquad (17)$$

где E_0 — напряженность поля, рассчитанная для ровной земли;

f — частота, *Мгц*.

Для ровной земной поверхности напряженность поля увеличивается с укорочением длины волны. Это следует из формулы (11). В реальных условиях наличие неровностей приводит к компенсации этого увеличения, и напряженность поля почти не зависит от частоты.

В сильно гористой местности расчет, даже с учетом поправок, дает очень грубое приближение к действительности. Часто бывает трудно оценить места, где прием будет слабым и неуверенным. Для выяснения таких мест и выбора наилучшего места расположения передающей антенны применяется следующий способ.

Изготовляют рельефный макет местности со всеми возвышенностями и неровностями. В предполагаемое место расположения антенны помещают небольшую лампочку. Интенсивность света на рельефной карте характеризует напряженность поля УКВ передатчика на местности. Если сфотографировать этот макет и карту местности в одном и том же масштабе, а затем наложить диапозитивы и сделать общий отпечаток, то получится карта распределения напряженности поля. Перемещая лампочку (передатчик), можно выбрать наивыгоднейшее место расположения передатчика. Такой способ был применен для выбора места расположения вещательной УКВ станции в Граце (Австрия).

Нередко бывает необходимо наладить связь или желательно вести прием телевизионных передач в холмистой

местности, причем приемный пункт оказывается расположенным за холмом в области тени. Тогда напряженность поля может оказаться недостаточной для приема. Для того, чтобы прием был возможен, обычно применяется один из следующих способов.

На склоне холма, обращенном в сторону передатчика, близко к вершине ставят приемную антенну (рис. 16,*а*). Сигнал от приемной антенны подается на предварительный усилитель, а после него — по кабелю на мощный усилитель

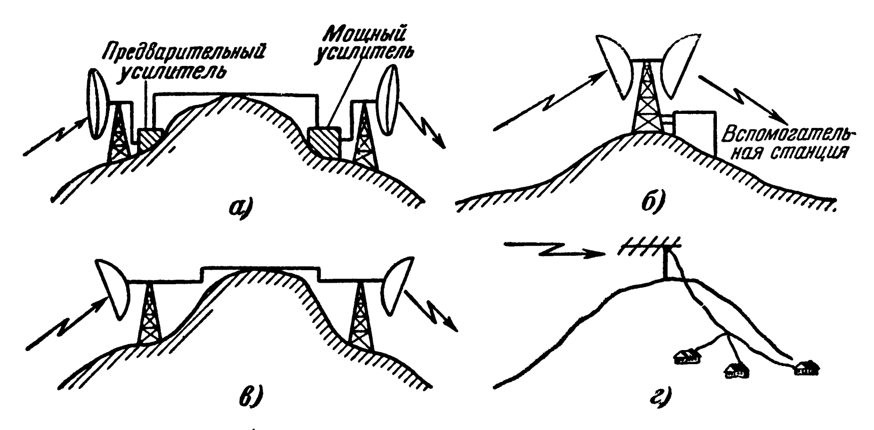


Рис. 16. Способы приема УКВ в области тени.

и передающую антенну, обращенную в сторону приемного пункта. Техническая трудность заключается в устранении обратной связи между передающей и приемной антеннами, если мощный передатчик работает на волне, на которую настроен приемник. Для устранения обратной связи передающую антенну относят на несколько десятков метров от приемной и располагают их на разных склонах холма. В этом случае требуются источник питания и постоянное обслуживание установки. Но все-таки этот способ достаточно прост и дешев. Такая система может ретранслировать только одну программу.

Можно использовать вспомогательный передатчик, который работал бы на волне, отличной от волны основной станции (рис. 16,*б*). В этом случае устраняется опасность обратной связи. Приемную и передающую антенну не нужно разносить на большие расстояния. Сигнал с приемной антенны усиливается и детектируется в приемнике,а затем моду-

лирует вспомогательный передатчик. Оборудование требуется более сложное, необходимы источники питания и постоянное обслуживание. Такая система одновременно тоже может ретранслировать только одну программу. Для приема другой программы необходимо перестроить приемник.

Наиболее простым способом является применение пассивного ретранслятора (рис 16,*в*). Антенну с большим коэффициентом усиления располагают на вершине холма в пределах прямой видимости передатчика. Сигнал от приемной антенны подается непосредственно на передающую антенну, расположенную в пределах прямой видимости приемного пункта. Этот способ можно применять только при наличии достаточно сильного сигнала и только в том случае, когда расстояние от передатчика до ретранслятора значительно больше, чем от ретранслятора до приемника. Пассивный ретранслятор имеет ряд преимуществ. Для него не нужны источники питания, он прост и дешев и не требует постоянного обслуживания. Большим его преимуществом является то, что он может ретранслировать одновременно несколько программ.

Для приема телевизионных передач в поселке, расположенном за холмом на небольшом расстоянии от вершины холма, целесообразно применить коллективную антенну (рис. 16,*г*). Сигнал от антенны можно подать на предварительный усилитель и затем по общему фидеру — в поселок. Для развязки между отдельными приемниками ставятся катодные повторители.

При проектировании УКВ станций необходимо знать, какова будет напряженность поля в городских условиях. Большой город представляет собой сильно пересеченную местность. В точку приема может приходить несколько волн, отраженных от различных зданий и сооружений. Даже в том случае, когда между передающей и приемной антеннами имеется прямая видимость, поле в точке приема носит очень сложный характер. Характер электромагнитного поля в городе может меняться не только от точки к точке, но и во времени из-за отражения радиоволн от движущегося транспорта (трамваев, автомобилей). При движении транспорта меняется расположение «неровностей» и напряженность поля изменяется. Часто наблюдается, что когда приемная антенна расположена невысоко (1-й и 2-й этажи), принимается не прямой сигнал, а отраженный от большого здания, расположенного поблизости.

Еще сложнее структура поля в помещениях. Комнатную антенну для получения наилучшего приема далеко не

всегда приходится размещать в направлении на телецентр. В помещении перемещение антенны на несколько метров часто приводит к существенному изменению условий приема. Понятно, что при такой сложной картине поля и таком большом числе влияющих на него факторов нельзя дать точную формулу для расчетов напряженности поля. Оценить хотя бы приблизительно среднее значение напряженности поля можно по эмпирическим формулам, полученным на основании обобщения большого количества опытных данных. Опыт показывает, что в среднем в условиях большого города для оценок может быть использована формула (11), но полученные по ней значения нужно помножить на некоторый коэффициент, меньший единицы. Величина этого коэффициента колеблется в пределах 0,25—0,4. При этом высоту антенн следует отсчитывать от поверхности земли. Даже в этом случае будет получено только грубое приближение значения напряженности поля.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ТРОПОСФЕРНОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ УКВ

С увеличением мощности передающих устройств и повышением чувствительности приемников стал возможным прием УКВ за пределами прямой видимости. Теоретически было показано, что появление на таких расстояниях поля небольшой напряженности может быть объяснено дифракцией УКВ. Однако наблюдавшиеся напряженности поля превосходили уровни, рассчитанные по законам дифракции. Оказалось, что такое увеличение напряженности поля происходит благодаря процессам, происходящим в тропосфере.

Основными факторами, способствующими дальнему распространению УКВ в тропосфере, являются повышенная рефракция радиоволн, отражение от слоистых неоднородностей тропосферы и рассеяние турбулентными неоднородностями тропосферы. Большей частью эти факторы действуют одновременно, и трудно разделить их влияние.

Дифракция

Дифракция играет существенную роль в том случае, когда препятствие меньше или соизмеримо с длиной волны. Кривизна земного шара представляет препятствие для распространения радиоволн, притом препятствие весьма больших размеров. Поэтому УКВ плохо дифрагируют вокруг выпуклой поверхности земли. Но все-таки за счет дифрак-

ции УКВ могут распространяться за пределы прямой видимости в область тени. Строгое решение вопроса об определении напряженности поля дифракции весьма сложно. Такое решение было получено советским ученым В. А. Фоком. Однако полученные при этом формулы сложны для инженерных расчетов.

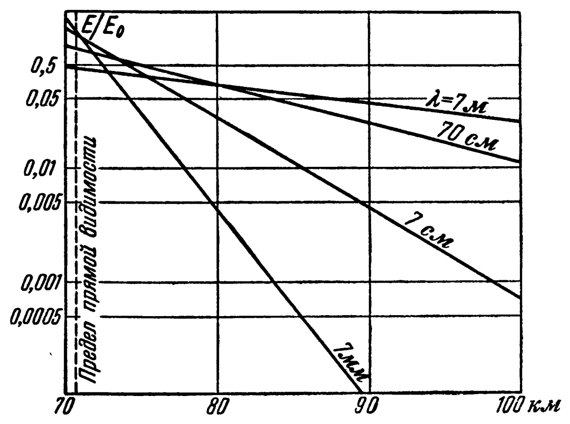


Рис. 17. Дифракционное поле за пределами видимого горизонта.

Хорошее совпадение с опытом дает расчет по более простой дифракционной формуле, предложенной Б. А. Введенским. Напряженность поля в точке приема в зоне дифракции, как и в пределах прямой видимости, увеличивается с поднятием передающей и приемной антенн. При укорочении длины волны напряженность поля очень резко уменьшается.

На рис. 17 показан расчетный график зависимости напряженности поля от расстояния для длин волн от 7 *м* до 7 *мм*. Принято, что передающая и приемная антенны помещены на высоте 100 *м*. Тогда предел прямой видимости составляет 71 *км*. Напряженность поля отложена в относительных единицах в логарифмическом масштабе. В таком масштабе зависимость напряженности поля от расстояния имеет вид прямой. Наклон прямых тем круче, чем короче волна, т. е. с укорочением волны резче убывает напряженность поля за горизонтом.

В последние годы были опубликованы данные о приеме метровых волн на трассе, экранированной высокой горной вершиной, причем протяженность трассы превышала предел прямой видимости. Оказалось, что напряженность поля за

горой в некоторых случаях не убывает, а возрастает с увеличением расстояния. Вершина горы действует подобно приемно-передающей антенне. Поле в точке приема выражается суммой четырех волн, распространяющихся по путям АБВ, АГБВ, АБДВ и АГБДВ (рис. 18), амплитуды и фазы которых зависят от геометрии трассы и коэффициента отражения от поверхности земли.

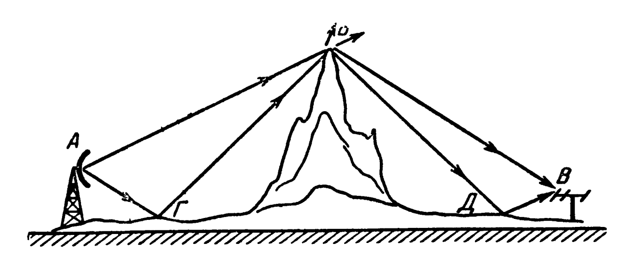


Рис. 18. Влияние высокой горы на распространение УКВ.

Явление увеличения напряженности поля отчетливо наблюдалось при проведении опытов по сооружению ретрансляционной линии в штате Колорадо (США). Измерения проводились на нескольких трассах, каждая из которых имела протяженность около 150 *км*. Одна из трасс, проходившая в Скалистых горах, пересекала вершину Пайка, имеющую высоту около 4 000 *м*. Оказалось, что на этой трассе напряженность поля в точке приема значительно превосходила напряженности поля на других трассах. Кроме того, прием был значительно устойчивее, почти не наблюдалось замираний, вызываемых обычно изменением метеорологических условий, так как распространение происходило в более высоких стабильных слоях атмосферы.

Это интересное явление еще мало исследовано. Использование его при осуществлении УКВ связи в горах может оказаться очень полезным.

Рефракция и возникновение «атмосферного волновода»

Как уже говорилось, под влиянием атмосферной рефракции траектория волны из прямолинейной становится криволинейной. При этом в случае нормальной рефракции луч проходит на той же высоте над Землей на большем расстоянии. Таким образом, при тех же высотах антенн дальность прямой видимости увеличивается.

В случае нормальной рефракции при $k={}^4/_3$ дальность прямой видимости в километрах определится как

$$r_0=\sqrt{2Rk}\,(\sqrt{h_1}+\sqrt{h_2})=4{,}12\,(\sqrt{h_1}+\sqrt{h_2}), \qquad (18)$$

т. е. под действием рефракции дальность прямой видимости возрастает на 8% [ср. с формулой (9)].

Для того, чтобы при вычислении напряженности поля за пределами прямой видимости учесть влияние рефракции, в дифракционные формулы вместо действительной величины радиуса земного шара подставляют значение эквивалентного радиуса Земли, который зависит от состояния атмосферы.

Это положение проверялось опытным путем. В 1954 г. в Западной Германии проводились специальные наблюдения по распространению УКВ в области тени. Наблюдения велись на трассе длиной 76 *км*. Для опытов использовались амплитудно-модулированный передатчик мощностью 180 *вт*, работавший на частоте 68 *Мгц*, и приемник чувствительностью 10 *мкв*. Передающая антенна помещалась на высоте 90 *м*, а приемная — на высоте 30 *м*.

Одновременно с измерением напряженности поля примерно в середине трассы запускали метеорологические радиозонды (приборы, поднимающиеся на небольших воздушных шарах и автоматически специальным кодом сообщающие по радио сведения о состоянии атмосферы: давлении, влажности и температуре). По сведениям, получаемым от радиозондов, подсчитывали коэффициент преломления атмосферы и эквивалентный радиус Земли. Полученную по расчету величину напряженности поля сравнивали с измеренным значением и, таким образом, проверяли применимость для расчетов дифракционной формулы.

Такие измерения вели в течение 4 лет. При этом первые 2 года наблюдений не дали определенных результатов: получались то хорошие совпадения, то очень плохие. Причина этого заключалась в том, что трасса первоначально была выбрана так, что она проходила в 90 *км* от метеорологической станции, где велись наблюдения за состоянием атмосферы. В следующие 2 года изменили трассу и проложили ее так, что метеорологическая станция находилась в средней части пути. Тогда стали получаться хорошие совпадения расчетов с измерениями.

Эти опыты показали, что за пределами видимого горизонта в зоне дифракции напряженность поля сильно зависит от состояния атмосферы.

Следует отметить, что в зоне дифракции, где напряженность поля меньше, чем в зоне прямой видимости, влияние атмосферной рефракции сказывается сильнее. Изменения, вносимые в напряженность поля влиянием атмосферной рефракции, невелики по сравнению с напряженностью поля в пределах прямой видимости и значительны по сравнению со слабым дифракционным полем.

Иногда в тропосфере создаются такие условия, что коэффициент преломления изменяется с высотой необычно. Например, после захода солнца поверхность Земли быстро охлаждается; охлаждаются и нижние слои воздуха, верхние же слои воздуха еще остаются нагретыми. Значит, температура воздуха в этом случае не убывает, а возрастает с высотой и коэффициент преломления убывает с увеличением высоты более резко, чем при нормальной рефракции.

Резкое убывание коэффициента преломления атмосферы с высотой наблюдается часто над водной поверхностью: вблизи воды влажность воздуха велика и резко убывает с изменением высоты. Возможно и обратное явление: ветер принес холодный воздух с моря, вблизи же Земли воздух остался теплым. Тогда температура убывает с высотой быстрее, чем обычно, а коэффициент преломления убывает с высотой медленнее, чем обычно, или может даже возрастать.

При отклонении закона изменения коэффициента преломления атмосферы от стандартного изменяется и кривизна луча. На рис. 19 схематически показано, как при различных видах изменений коэффициента преломления с высотой меняется кривизна траектории луча.

Рис. 19,*а* соответствует случаю нормальной атмосферной рефракции. Коэффициент преломления меняется при этом на $4 \cdot 10^{-6}$ при подъеме на каждые 100 *м*. Траектория радиоволны представляет собой дугу окружности радиусом 25 000 *км*, обращенную выпуклостью вверх.

Рис. 19,*б* соответствует случаю так называемой отрицательной атмосферной рефракции, когда коэффициент преломления возрастает с высотой. Траектория луча обращена выпуклостью вниз, и волна удаляется от земной поверхности быстрее, чем в случае нормальной рефракции. Это приводит к уменьшению напряженности поля на данном расстоянии и уменьшению дальности распространения УКВ. Если при нормальной рефракции был возможен прием где-то на границе прямой видимости, то при появлении отрицательной рефракции прием станет невозможным, связь нарушается.

Рис. 19,*в* соответствует случаю положительной атмосферной рефракции, когда коэффициент преломления убывает с высотой быстрее, чем при нормальной рефракции. Траектория волны обращена при этом выпуклостью вверх и имеет меньший радиус кривизны. Если показатель преломления изменяется с высотой больше чем на $16 \cdot 10^{-6}$ на каждые 100 *м*, то траектория луча станет настолько изогнутой, что волна получит возможность вернуться на земную

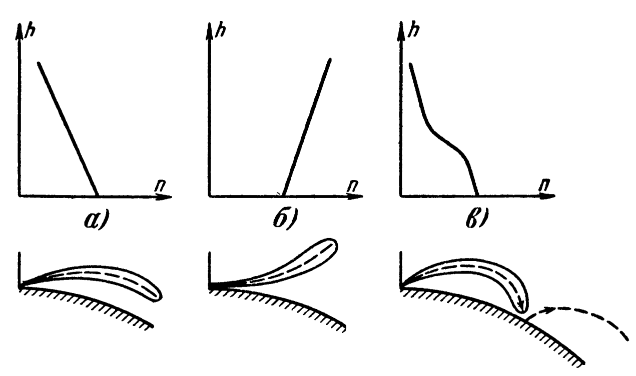


Рис. 19. Различные случаи атмосферной рефракции.
а — нормальная; *б* — отрицательная; *в*—положительная (атмосферный волновод).

поверхность. В случае положительной рефракции напряженность поля на данном расстоянии от передатчика увеличивается и увеличивается дальность распространения радиоволн.

Положительная рефракция радиоволн наблюдается обычно в антициклонную погоду при вечернем охлаждении почвы и наиболее часто в теплое время года.

Рефракционные свойства атмосферы меняются сравнительно медленно, поэтому поле, обусловленное повышенной рефракцией, оказывается достаточно устойчивым, без глубоких замираний. Явление положительной рефракции объясняет возможность хорошего приема телевизионных передач на расстояниях порядка 200 *км*.

Когда область положительной рефракции простирается на значительные расстояния над земной поверхностью, то в этом районе УКВ могут быть приняты на весьма больших расстояниях от передатчика. Распространение УКВ в этом случае происходит следующим образом: вернувшийся на Землю луч отражается от земной поверхности, затем рефрагирует в атмосфере и снова возвращается на Землю.

Радиоволна распространяется путем последовательного отражения от атмосферы и земной поверхности.

Явление это аналогично распространению радиоволн в металлическом волноводе и поэтому получило название «атмосферного волновода». Но в отличие от металлического волновода стенки атмосферного волновода полупрозрачны. Только часть энергии волны отражается от атмосферы, а часть, преломляясь, проходит, теряясь для приема.

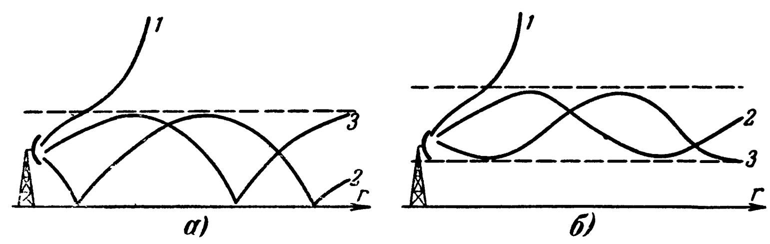


Рис. 20. Распространение УКВ в условиях атмосферного волновода.
а — приземный волновод; *б* — поднятый волновод.

При одних и тех же условиях рефракции более короткие волны лучше отражаются и меньше просачиваются сквозь «стенки» атмосферного волновода. Для атмосферного волновода определенной высоты по аналогии с металлическим имеется некоторая критическая длина волны, длиннее которой волны быстро затухают и не распространяются в волноводе. Поэтому распространение радиоволн в условиях атмосферного волновода наблюдается чаще всего на дециметровых и сантиметровых волнах и — реже — на метровых.

Размеры атмосферного волновода должны во много раз превосходить длину волны. Так, для сантиметровых волн необходим волновод высотой 30—35 *м*.

Рис. 20 иллюстрирует распространение УКВ в условиях атмосферного волновода.

Рис. 20,*а* соответствует случаю так называемого «приземного волновода». Начиная непосредственно от земной поверхности, создались такие атмосферные условия, что рефракция положительна и только на некоторой высоте становится нормальной. Уровень, до которого продолжается положительная рефракция, является высотой волновода.

Рис. 20,*б* соответствует случаю приподнятого волновода. Рефракция от земной поверхности до некоторой высоты нормальна, затем на некотором участке положительна (это и есть волновод) и затем снова нормальна. Роль верхней и нижней стенок волновода играет атмосфера. Вол-

на распространяется в волноводе, отражаясь от верхней и нижней воздушной стенок волновода.

В условиях волноводного канала только наиболее пологие лучи (*2* и *3* на рис. 20) отражаются от стенок канала, а более крутые (*1*) просачиваются сквозь стенки. Если передатчик и приемник находятся в пределах волновода, то окажется возможным прием на больших расстояниях. В противном случае дальность приема может даже уменьшится.

Возможность распространения УКВ в условиях волноводного канала была установлена советским ученым П. Е. Краснушкиным в 1943 г. Дальнейшее развитие теория атмосферного волновода получила в работах В. А. Фока.

Влияние волноводного канала на распространение УКВ неоднократно подвергалось тщательному исследованию. Так, например, в Германии в течение двух последних лет непрерывно проводились наблюдения за напряженностью поля УКВ на трассах протяженностью 200—300 *км*. Одновременно тщательно исследовались метеорологические условия. При помощи воздушных шаров велись измерения влажности, давления и температуры воздуха на высотах до 200 *м*, которые давали возможность обнаружить присутствие волноводного канала. Случаи появления волноводного канала сопровождались значительным увеличением напряженности поля. Метеорологические измерения проводились на приемном конце трассы.

Наблюдалось такое интересное явление: появление волноводного канала, отмечаемое метеорологическими измерениями, иногда несколько опережало по времени, а иногда отставало от увеличения напряженности поля. Выяснилось, что это зависело от направления ветра: если ветер дул от передающего пункта к приемному, то сначала возрастала напряженность поля, а затем отмечалось появление атмосферного волновода. Если бы метеорологические измерения велись в средней части пути, то результаты метеорологических измерений точно совпадали бы во времени с изменением напряженности поля.

На основании метеорологических данных можно давать прогнозы распространения УКВ. С другой стороны, исследование влияния атмосферных условий на распространение УКВ может позволить по изменению условий распространения судить об изменениях в атмосфере и использовать это для прогнозирования погоды.

Во всех ли случаях появление волноводного канала улучшает условия связи? Оказывается бывают случаи,

когда при появлении атмосферного волновода связь полностью нарушается. Так, например, когда на побережье Австралии впервые установили радиолокационные установки, то обнаружилось, что часто сильно увеличивалась дальность «видимости» станций для объектов, находящихся на морской поверхности, и в то же время станции, следящие за самолетами, переставали обнаруживать их при сравнительно небольших расстояниях. Для исследования причин

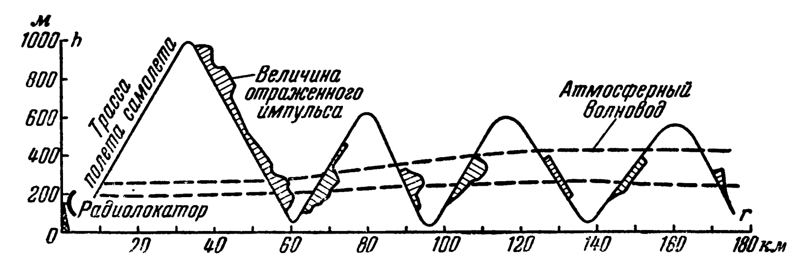


Рис. 21. Работа радиолокационной станции обнаружения самолетов в условиях атмосферного волновода.

сокращения видимости радиолокационных установок, следящих за самолетами, были проведены специальные наблюдения. Самолет совершал полет в сторону моря на расстояние до 200 *км*, то поднимаясь до 1 000 *м* над уровнем моря, то снижаясь до бреющего полета. В это время работала береговая радиолокационная станция на частоте 200 *Мгц* и велись метеорологические наблюдения, позволившие определить изменение коэффициента преломления атмосферы с высотой.

На рис. 21 графически показаны результаты одного такого полета. Сплошной линией нанесена трасса полета самолета. На тех участках трассы, где самолет отмечался станцией, наложены штрихи, пропорциональные интенсивности принятого сигнала. Пунктирными линиями отмечены границы волноводного канала, построенные на основании метеорологических измерений.

Из рис. 21 видно, что в области ниже и внутри атмосферного волновода самолет обнаруживался на расстояниях свыше 150 *км*. Когда же самолет поднимался выше атмосферного волновода, то станция не могла его обнаружить, даже на небольшом расстоянии. Исключение составляет первый участок пути, где самолет находится в области полутени, куда просачивается часть энергии, излученной антенной радиолокационной станции.

Таким образом, в присутствии атмосферного волновода дальность действия самолетной радиолокационной станции резко сокращается. Бороться с этим можно либо путем увеличения излучаемой мощности, либо понижением рабочей частоты. При удлинении волны большая часть энергии просачивается сквозь стенки волноводного канала и, следовательно, он оказывает меньшее влияние.

Интересный материал для изучения влияния атмосферных волноводов на распространение радиоволн могут дать наблюдения радиолюбителей, работающих во втором и более высокочастотных диапазонах. Так, обобщение радиолюбительских наблюдений в диапазоне 2 *м*, работавших в Западной Европе, дало ценный экспериментальный материал. Дальние любительские связи наблюдались в ясную антициклонную погоду. Возможность дальних связей длилась в течение 2—3 дней подряд, и ни разу не наблюдалось более длительного периода. При этом удавалось установить связи на расстоянии до 600—800 *км*. Бывали случаи, что при, казалось бы, благоприятной для дальнего распространения УКВ погоде связи не наблюдалось.

На волнах сантиметрового диапазона наблюдались связи на расстоянии 1 000 *км* и более. На волнах длиной 5—10 *м* волноводное распространение наблюдается редко.

Когда чаще возможен сверхдальний тропосферный прием? В ответе на этот вопрос мнения исследователей расходятся. Большинство наблюдений показало, что чаще всего такой прием наблюдается во время антициклона, главным образом летом во второй половине дня или вечером. Но некоторые наблюдатели отмечали появление атмосферных волноводов зимой или в утренние часы. По-видимому, на различных трассах в разных климатических условиях благоприятные условия для образования атмосферных волноводов могут появляться в разное время.

Понятно, что при разнообразных климатических условиях нашей обширной страны в разных районах различно и время появления условий, благоприятных для сверхдальнего распространения. Только радиолюбители могут охватить все уголки страны и помочь широкому изучению этого интересного явления.

Отражение от слоистых неоднородностей тропосферы

В некоторых случаях в атмосфере появляются слои воздуха, в которых коэффициент преломления резко меняется, претерпевая как бы «скачок». Это наблюдается, например, при прохождении фронта холодного воздуха.

От резкой границы изменения коэффициента преломления воздуха могут отражаться радиоволны, падающие полого на эту границу (рис. 22). Волны, отраженные от слоистой неоднородности, могут быть приняты на расстоянии до 300 *км* от передатчика.

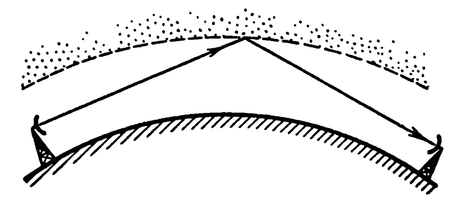


Рис. 22. Отражение от слоистых неоднородностей.

Однако слоистые неоднородности появляются нерегулярно, что не позволяет использовать их для дальнего эксплуатационно надежного приема телевидения или связи. Напряженность поля в этом случае подвержена сильным колебаниям с глубокими замираниями за счет того, что в точку приема приходит несколько волн, разность фаз между которыми непрерывно меняется из-за изменений высоты и структуры слоя.

При приеме телевизионной передачи во время появления слоистых неоднородностей возможно появление на экранах телевизионных приемников многократных изображений.

Рассеяние радиоволн на неоднородностях тропосферных слоев

Дифракция и нормальная атмосферная рефракция могут объяснить возможность приема УКВ на расстояниях, незначительно превышающих пределы прямой видимости. Но в последнее время было обнаружено, что при применении остронаправленных антенн и передатчика достаточной мощности можно осуществить регулярную связь на УКВ на расстоянии 300—500 *км*. Такая возможность обусловлена рассеянием радиоволн на неоднородностях тропосферы.

Процесс рассеяния радиоволн еще далеко не изучен. Но грубо можно представить себе его следующим образом: радиоволны, падая на неоднородности тропосферы, наводят в них токи, аналогично тому, как это имеет место в приемной антенне. Неоднородности свободно колеблются и переизлучают энергию волны.

Основную роль в рассеянии радиоволн играют неоднородности размером 50—60 *м*, т. е. рассеяние радиоволн при дальней связи происходит на слабых неоднородностях, размеры которых все же во много раз превышают длину волны.

При рассеянии радиоволн на каплях воды размеры неодно-

родностей много меньше длины волны и рассеиваемые волны распространяются равномерно во все стороны.

При условиях, имеющих место в тропосфере, рассеяние происходит в пределах угла, составляющего несколько градусов с направлением падающего луча. Поэтому при использовании для связи тропосферного рассеяния следует применять остронаправленные антенны, ориентированные так, чтобы их диаграмма направленности была касательной

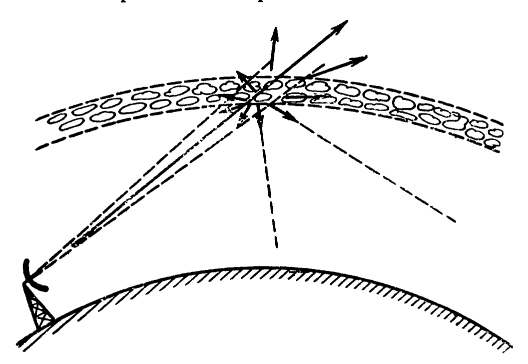


Рис. 23. Схема рассеяния УКВ в тропосфере.

к земной поверхности. С увеличением угла подъема диаграммы направленности над поверхностью Земли напряженность поля рассеянного сигнала резко уменьшается. Уменьшение происходит также потому, что в верхних слоях атмосфера более однородна.

Схематически рассеяние радиоволн на неоднородностях тропосферы показано на рис. 23. Из этой схемы видно, что прием рассеянного сигнала возможен на различных расстояниях вплоть до предельного, зависящего от высоты рассеивающей области. Очевидно, что основная часть энергии волны проходит сквозь рассеивающую область, теряясь для приема. Только небольшая часть энергии возвращается на Землю, где она может быть принята.

На рис. 24 показана схема работы линии связи при использовании тропосферного рассеяния. Передающая антенна облучает некоторый участок тропосферы. Луч приемной антенны как бы вырезает часть тропосферы, названную «рассеивающим объемом», с которого приемная антенна «собирает» рассеянные волны. Таким образом, на приемную антенну приходят волны не от точечного источника, каким можно считать передающую антенну, а от источника, распределенного по значительному объему пространства. Свой-

ства такого объемного источника колебаний определяют в значительной мере характеристики линии связи.

Напряженность поля рассеянного сигнала подвержена замираниям, получающимся в результате сложения колебаний, приходящих от разных участков рассеивающего объема. Частота замираний увеличивается с увеличением скорости ветра и укорочением волны. Моменты замираний

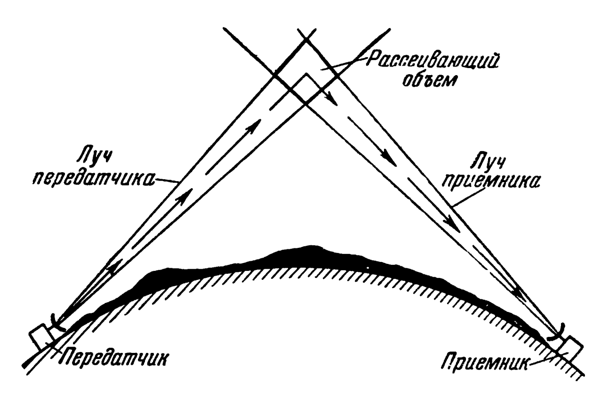


Рис. 24. Схема связи на УКВ при использовании явления рассеяния в тропосфере.

не совпадают в различных точках пространства. Это позволяет применять для борьбы с замиранием прием на разнесенные антенны. Антенны разносят на расстояние 25—100 длин волн и используют наибольший из двух сигналов.

Рассеяние УКВ в тропосфере вызывает некоторые ограничения в ширине полосы частот, связанные с возможностью нескольких путей прохождения радиоволн. Наиболее короткий путь проходит по нижней части рассеивающего объема, а наиболее длинный — по его верхней части. Поэтому один сигнал запаздывает по отношению к другому, что вызывает удлинение передаваемого импульса, а это эквивалентно сужению полосы частот. Однако последние исследования показали, что ширина полосы частот оказывается достаточной для удовлетворительной передачи телевидения.

Многочисленные опыты показали, что напряженность поля рассеянного сигнала не зависит от длины волны. Это и позволило использовать дециметровые и сантиметровые волны. На графике рис. 25 нанесены результаты измерений напряженности поля для различных расстояний. Кружками обозначены измеренные значения на волне 1 *м*, а крестика-

ми — на волне 10 *см*. Видно, что в том и другом случаях уровень напряженности поля лежит в одних пределах. Разброс точек объясняется тем, что во время измерений менялись атмосферные условия. Кривая линия показывает средний уровень напряженности поля. Здесь же для сопоставления нанесены величины напряженности поля, рассчитанные по закону дифракции с учетом нормальной рефракции для волны длиной 10 *см*. В расчете, также как и в эксперименте, высота передающей антенны принималась равной 36 и приемной 21 *м*. На графике напряженности поля отложены в относительных единицах в логарифмическом масштабе.

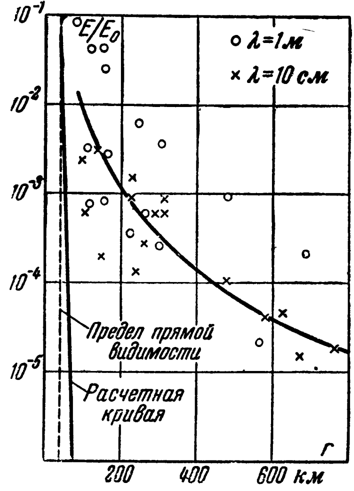


Рис. 25. Измеренные значения напряженности поля УКВ, рассеянных в тропосфере.

На рис. 25 видно, что чем дальше за пределы прямой видимости, тем больше расхождение между опытом и дифракционной теорией, так как все бóльшую роль играет рассеянное отражение.

Экспериментально установлено, что напряженность поля рассеянного сигнала убывает обратно пропорционально третьей-четвертой степени расстояния, тогда как при распространении в пределах прямой видимости напряженность поля убывает обратно пропорционально второй степени.

Такое быстрое убывание напряженности поля и сильные замирания предъявляют высокие требования к аппаратуре. Приходится применять передатчики значительной мощности (порядка 10 *квт*) и остронаправленные антенны. Сконструировать остронаправленные антенны легче для более коротких волн. Чем короче волна, тем меньше могут быть размеры антенны для создания луча определенной ширины. Поэтому для передачи путем рассеяния применяются дециметровые и сантиметровые волны.

На рис. 26 изображена параболическая антенна, использующаяся на одной из линий связи рассматриваемого типа. Коэффициент усиления антенны равен 10 000. Антенна состоит из облучателя и параболического отражателя. Отражатель, диаметр которого равен 18 *м*, сконструирован из

алюминиевых трубок. Такая антенна представляет собой сложное сооружение весом более 1 *т*. Она должна быть очень прочной, чтобы выдержать напор ветра.

Основное применение тропосферное рассеяние нашло для ретрансляционных линий. Несмотря на то, что требуются мощные передатчики, сложные антенны и чувствительные приемные устройства, использование рассеяния для ретран-

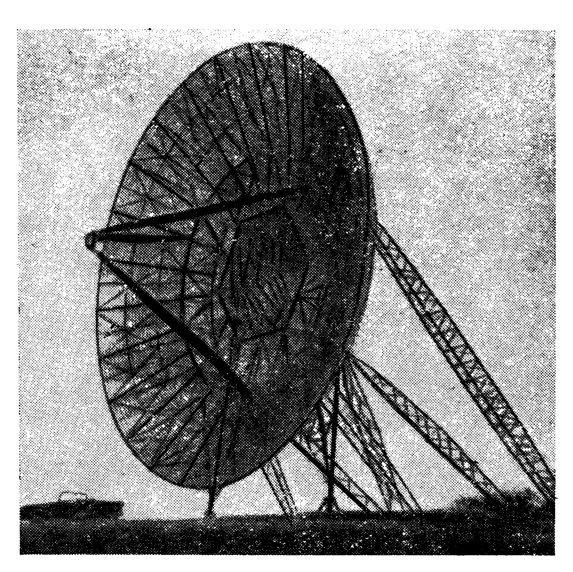


Рис. 26. Вид параболической антенны, установленной на дальней УКВ линии связи, использующей тропосферное рассеяние радиоволн.

сляции оказалось экономически выгодным. Такой способ передачи позволил размещать промежуточные станции на расстоянии не 50—70 *км*, как обычно, а 200—400 *км*, что сократило число необходимых станций. Линии, использующие тропосферное рассеяние, могут быть применены для передачи частотно-модулированного вещания, телевидения и многоканальной связи.

В настоящее время такие линии, например, пересекли Средиземное море, связав Сицилию и Сардинию с африканским берегом, перекрыв расстояние около 300 *км*. На такое же рассгояние в США передавалось телевидение. Линия передачи проходила над морем и пересекала Лонг Айленд. Качество принимаемого изображения по литературным данным было вполне удовлетворительным.

ГЛАВА ПЯТАЯ

ИОНОСФЕРНОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ УКВ

До недавнего времени считалось, что УКВ могут распространяться путем отражения от ионосферы только в исключительных случаях, причем настолько редко, что практически с этим явлением можно не считаться.

С развитием телевидения и УКВ вещания все чаще стал наблюдаться сверхдальний прием метровых волн. В некоторых случаях оказывалось, что удаленная станция создавала существенные помехи для приема местных телевизионных передач. Проведенные исследования показали, что метровые волны регулярно распространяются на расстояния свыше 1 000 *км* и при применении специальной аппаратуры могут быть уверенно приняты.

Возможность сверхдальнего распространения метровых волн обусловливают следующие явления, происходящие в ионосфере: 1) повышение электронной концентрации слоя F_2 в годы максимума солнечной деятельности; 2) появление спорадического слоя E_s и 3) рассеяние радиоволн на неоднородностях ионосферы. Каждый из указанных видов распространения имеет свои характерные особенности.

На рис. 27 изображена схема всех трех случаев ионосферного распространения метровых волн.

Отражение от регулярного слоя F_2

Путем отражения от слоя F_2 распространяются короткие волны. Для волн короче 10 *м* слой F_2 является большей частью прозрачным. Однако в годы максимума солнечной деятельности электронная плотность слоя F_2 достигает в дневное время зимой таких высоких значений, что часто оказывается возможной радиосвязь на волнах длиной 10—6 *м*.

Зона молчания составляет при этом не менее 2 000 *км*. Предельное расстояние передачи, обусловленное высотой слоя F_2, достигает 3 500—4 000 *км*. Кроме того, возможно распространение двумя «скачками», т. е. путем двух последовательных отражений: от слоя F_2 и от земной поверхности, что удваивает возможные расстояния дальности передачи. Таким образом, при отражении от слоя F_2 метровые волны могут распространяться на расстояние от передатчика примерно 2 000—7 000 *км*.

Предыдущие максимумы солнечной деятельности наблюдались в 1937—1938 и затем в 1947—1948 гг.

Зимой 1937 и 1938 гг. радиолюбители Ленинграда, работавшие в 10-метровом диапазоне волн, поддерживали радиосвязь с радиолюбителями Западной Сибири, Англии, Франции, Египта, Австралии, США и ряда других стран. Радиосвязь в этом диапазоне оказывалась возможной с октября по апрель в дневные часы с 10—11 до 18—19 *ч*. При

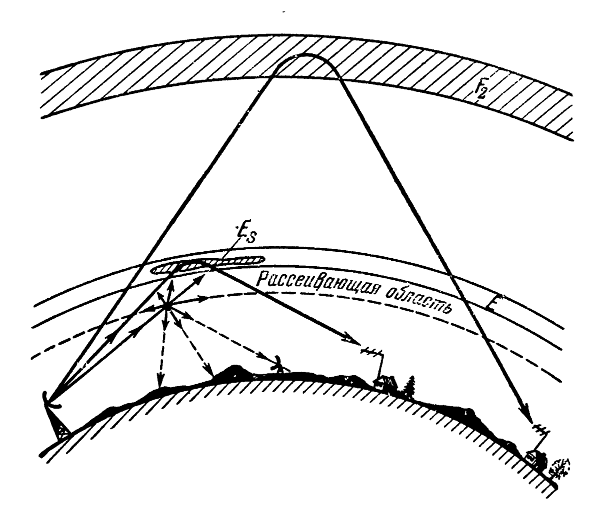


Рис. 27. Схема ионосферного распространения УКВ.

этом утром связь налаживалась с восточными корреспондентами, а вечером она была возможна с западными.

В зимние месяцы 1947—1949 гг. наблюдалось много случаев связи радиолюбителей Англии и США, работавших на волнах длиной около 6 *м*. Американские станции, работавшие на волне 7 *м*, были ежедневно слышны в Англии, а телевизионные передачи из Англии принимались на юге Африки.

Следующий максимум солнечной деятельности ожидается в 1957 г. С зимы 1956 г. рабочие частоты коротковолнового диапазона начнут возрастать. В зимние месяцы 1957—1959 гг. в дневные часы снова окажется возможен прием метровых волн на расстояниях свыше 2 000 *км*. Этим должны воспользоваться радиолюбители, работающие в первом диапазоне (38—40 *Мгц*), для установления сверхдальних

связей. Видимо, будут наблюдаться и случаи сверхдальнего приема телевидения. Наблюдения радиолюбителей за сверхдальним приемом представляют не только спортивный, но и научный интерес. Они помогут выяснить, насколько часто в различных широтах наблюдается такой прием и каковы его особенности.

Отражение от спорадического слоя E_s

Появляющийся в ионосфере спорадический слой E_s имеет временами электронную плотность, достаточную для отражения волн метрового диапазона. С увеличением числа и мощности телевизионных станций прием телепередачи на больших расстояниях при отражении радиоволн от слоя E_s стал нередким явлением.

Спорадический слой появляется нерегулярно, поэтому и этот вид сверхдальнего приема не может быть регулярным. Частота случаев сверхдальнего распространения зависит от частоты появления слоя E_s. Поэтому сверхдальний прием наблюдается чаще всего летом в дневное время и очень редко — зимой. От года к году частота случаев приема меняется, но нерегулярно. Прямой связи между 11-летним циклом солнечной активности и таким видом распространения установить не удалось. Чаще всего такой прием наблюдается в более южных широтах.

Высота, на которой образуется слой E_s (100—120 *км*) определяет максимальное расстояние передачи в 2 000—2 500 *км*. Плотность ионизации слоя определяет максимальные рабочие частоты и протяженность зоны молчания. Зона молчания для метровых волн составляет не менее 1 000 *км*. Чем короче волна, тем больше протяженность зоны молчания. Следовательно, прием метровых волн возможен на расстоянии примерно 1 000—2 500 *км*.

На широтах Москвы — Киева возможен сверхдальний прием на частотах до 70—75 *Мгц*, а на широтах Алма-Аты —Ашхабада — на частотах до 90—95 *Мгц*. Чем короче волна, тем реже возможен прием. Прием возможен в то время, когда спорадический слой находится в средней части пути между передатчиком и приемником. Спорадический слой появляется над небольшой территорией, поэтому обычно одновременно возможен прием только одной станции. Благодаря движению слоя через некоторое время оказывается возможным прием другой станции или первой станции в новом пункте. Продолжительность приема бывает различной: от нескольких минут до нескольких часов.

Как не удается в настоящее время указать точно время появления слоя E_s так нельзя и предсказать время появления приема и его продолжительность. Характерной особенностью при отражении от спорадического слоя E_s, является его полупрозрачность. Не вся энергия волны, падающей на слой, отражается от него, как это происходит при отражении от слоя F_2, а часть энергии проходит сквозь слой, теряется для приема, и только небольшая часть (иногда 0,1) отражается. При этом чем выше частота, тем меньшая часть энергии отражается. Поэтому наиболее часто возможен прием передач мощных станций (мощностью не менее 3—5 *квт*).

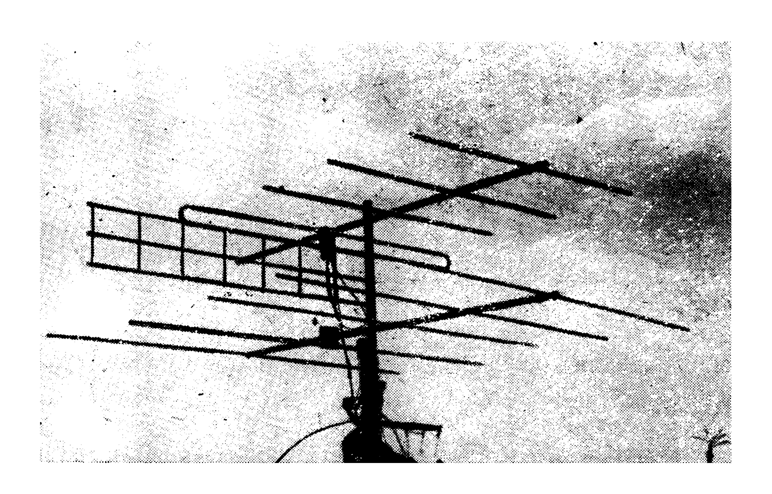


Рис. 28. Двухэтажная пятиэлементная антенна для дальнего приема телевидения.

В летние месяцы, начиная с 1954 г., в Московской обл. наблюдается прием телевизионных передач из Праги (расстояние около 1 800 *км*). Напряженность поля пражской станции оказывается временами настолько значительной, что передачи московской станции совершенно вытесняются. Временами удаленная станция создает только сильные помехи, проявляющиеся в виде «муара» на экране и треска в громкоговорителе. В пределах самого г. Москвы, как и в непосредственной близости от других мощных телецентров, где напряженность поля, создаваемая местным передатчиком, велика, сверхдальнего приема почти не наблюдается. Прием передач из Москвы наблюдается в различных странах За-

падной Европы. На Украине возможен прием из Италии, Дании, Швейцарии. В Прибалтике смотрят передачи из Парижа и Лондона.

У нас и за границей многие радиолюбители специально совершенствуют свою аппаратуру для сверхдальнего приема телевидения. Для этого повышают чувствительность приемника и применяют направленные антенны. Хорошие результаты получаются при использовании двухъярусной

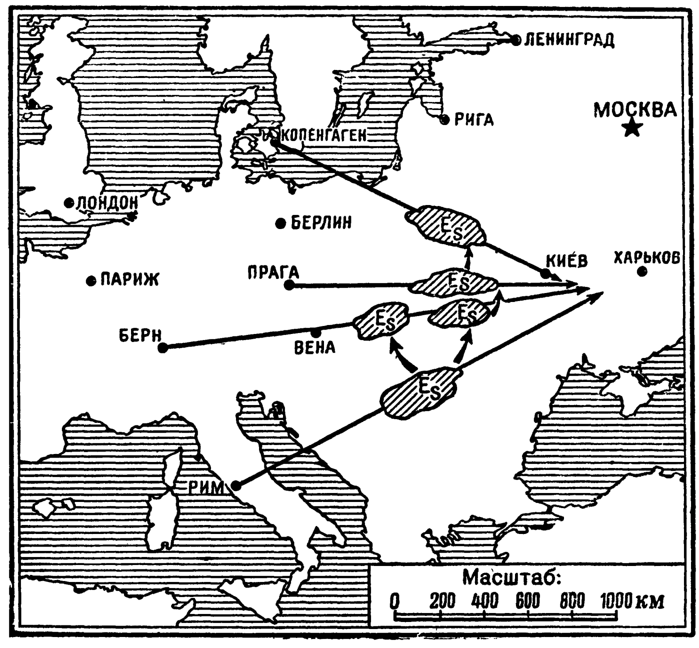


Рис. 29. Перемещение спорадического слоя E_s.

пятиэлементной антенны, имеющей коэффициент усиления 10—12 (рис. 28). В том случае, когда предусмотрена возможность поворота антенны, удается следить за движением спорадического слоя и по мере его перемещения принимать передачи нескольких станций. Например, если спорадический слой появился где-то в районе Карпат над Румынией, то на Украине возможен прием передач из Рима. Если слой E_s начнет перемещаться к северу, то тот же наблюдатель может увидеть последовательно передачи из Вены и Праги. Если слой E_s продвинется на северо-запад, наблюдатель увидит передачи из Швейцарии и Западной Германии. На карте

рис. 29 изображено перемещение слоя E при котором оказался возможным прием различных станций на Украине.

Отражение радиоволн от слоя E_s создает возможность для установления сверхдальних связей на УКВ. В этом случае применяются направленные приемные и передающие антенны, что позволяет наладить связь при мощности передатчика в несколько десятков ватт.

Радиолюбителям из г. Горького, работающим в 7-метровом диапазоне, удавалось летом 1956 г. установить связь с радиолюбителями Ростова-на-Дону, Свердловска, Барнаула. Радиолюбители Ростова-на-Дону в это же время устанавливали связь с Уфой, Молотовом, Кировом. Радиосвязь в этом диапазоне на такие расстояния возможна только благодаря отражению радиоволн от спорадического слоя. Характерно, что тем же радиолюбителям из г. Горького не удавалось установить связь на меньшие расстояния (с гг. Иваново, Владимир, Киров).

Возможности сверхдальней связи на УКВ путем отражения волн от слоя E_s далеко не изучены. Спорным остается вопрос: существенны ли помехи, создаваемые удаленными телевизионными станциями местному приему телевидения, и можно ли не учитывать возможности сверхдальнего приема, как это делается в настоящее время, при размещении и выборе рабочих волн новых станций? Решить этот вопрос помогут наблюдения радиолюбителей УКВ.

Рассеяние на неоднородностях ионосферных слоев

Рассмотренные выше явления — отражение от слоев F_2 и E_s — не могут обеспечить регулярной связи на УКВ. Загруженность диапазона коротких волн настоятельно требует изыскания новых диапазонов для связи, что натолкнуло на попытки исследования возможностей дальней связи на УКВ.

Начиная с 1950 г., стали вестись теоретические и экспериментальные исследования возможности регулярной связи на УКВ на расстоянии свыше 1 000 *км*. Основанием для этого послужило более детальное изучение строения ионизированных слоев атмосферы, установившее их неоднородное строение. Еще не изучено, что именно представляют собой эти неоднородности. Можно себе представить, что это как бы облака, в которых электронная плотность отличается от электронной плотности окружающей среды. Следовательно,

и диэлектрическая проницаемость облака отличается от диэлектрической проницаемости окружающей среды.

Размер неоднородностей оценен исследователями в 100—200 *м*, т. е. для УКВ размер неоднородностей много больше длины волны. Наличие неоднородностей приводит к тому, что наблюдается рассеяние радиоволн. Еще в 30-х годах это явление было обнаружено в диапазоне коротких волн. При работе мощного коротковолнового передатчика слабые сигналы наблюдались в пределах зоны молчания. Было установлено, что эти сигналы исходили из области ионосферы, от которой отражались радиоволны. Явление это было названо «обратным рассеянием». Дальнейшие наблюдения показали, что рассеянные сигналы, хотя и очень слабые, могут наблюдаться во время замирания основного сигнала за пределами зоны молчания. Такое рассеяние названо «прямым рассеянием».

Рассеяние на неоднородностях ионосферы происходит аналогично рассеянию на неоднородностях тропосферы, т. е. падающая на ионизированный слой волна рассеивается отражающей областью, которая служит источником этого вторичного рассеяния. Но в 30-х годах не было оценено, что за счет этого явления возможно осуществление регулярной связи на волнах короче тех, которые могут отражаться в данных условиях.

За последние 20 лет изучались неоднородности ионосферы, их размеры, горизонтальное движение и сделаны были попытки установить причины появления и закономерности, свойственные этим неоднородностям. Однако только с 1950 г. начались попытки применить явление рассеяния для дальней связи на УКВ.

В 1951 г. в США под руководством ученого Бейли были поставлены опыты по систематическому наблюдению за приемом сигналов частотой 50 *Мгц* на расстоянии 1 250 *км* от передатчика. Применялись остронаправленные (ромбические) передающая и приемная антенны и передатчик мощностью 20 *квт*. Опыты эти дали обнадеживающие результаты: в течение примерно полугода, когда велись наблюдения, не было ни одного случая нарушения связи. Правда, сигнал был очень слабым, однако достаточным для уверенного приема. Уровень сигнала менялся в течение суток. Конечно, этих наблюдений далеко недостаточно, чтобы сказать, будет ли такой способ связи надежным на других трассах, при других расстояниях; как лучше всего выбрать рабочие частоты и какова должна быть мощность передатчика.

Эти первые опыты побудили ученых всего мира заняться теоретическим и экспериментальным исследованием рассеяния радиоволн в ионосфере. В последующие годы было предложено несколько теорий, дающих формулы для расчета напряженности поля рассеянного сигнала. Однако не было возможности проверить их справедливость.

Только в конце 1955 г. были опубликованы результаты 4-летних наблюдений сверхдальнего регулярного приема метровых волн, проводившихся в США и Канаде.

В проведении наблюдений принимали участие ряд научно-исследовательских учреждений и радиолюбители. Наблюдения проводились на семи различных трассах протяженностью 1 200—2 300 *км*. Три исследуемые трассы лежали в 50—70° северной широты, т. е. пересекали зону полярных сияний. В этой области связь на коротких волнах подвержена особенно частым нарушениям, и поэтому изыскание возможности других видов связи представляет большой интерес. Остальные трассы лежали в средних широтах (30—45° северной широты).

Передачи велись на частотах 27, 50 и 107 *Мгц*. Использовались передатчики, создающие на входе антенны мощность около 30 *квт*. Для приема и передачи применялись одинаковые остронаправленные ромбические антенны с коэффициентом усиления около 20 *дб*. Диаграммы направленности антенн были рассчитаны так, чтобы максимум основного лепестка был направлен в среднюю точку пути на высоте 100—120 *км*. Приемники имели ширину полосы порядка 2 *кгц* и входное сопротивление 600 *ом*.

Наблюдения проводились круглосуточно, причем за все годы ни на одной из трасс ни разу не наблюдалось нарушения связи, хотя уровень принимаемого сигнала колебался в широких пределах, отличаясь от среднего значения временами на 20 *дб*. Было отмечено, что напряженность поля принимаемого сигнала претерпевает регулярные изменения. Уровень сигнала достигал максимального значения в полдень, а минимального — в 19—21 *ч* местного времени в средней точки пути. Наибольшие значения напряженности поля наблюдались в дневное время летом. Зимой они были несколько ниже и значительно ниже — весной и осенью.

Временами принимались сигналы, отраженные от спорадического слоя E_s и от следов метеорных тел. В этих случаях уровень сигнала значительно повышался или наблюдались отдельные кратковременные всплески. Эти высокие уровни сигнала рассматривались как случайные явления и при анализе не учитывались.

Ранее оставалось неясным, в какой именно области ионосферы происходило рассеянное отражение радиоволн. Проведенные опыты показали, что это рассеяние происходит днем на высоте 75—80 *км*, а ночью на высоте 85—90 *км*, т. е. ниже слоя E, но несколько выше поглощающего слоя D.

Как и следовало ожидать на основании разработанных ранее теорий, напряженность поля волны, рассеянной на ионосфере, зависит от рабочей частоты, убывая обратно пропорционально некоторой степени частоты. Точно установить зависимость напряженности поля от частоты не удалось. В отдельных наблюдениях показатель степени менялся в пределах 2—4. Следовательно, практически применимыми для этого типа связи окажутся частоты не выше 100 *Мгц*. Особенно ценным свойством рассматриваемого вида распространения радиоволн является устойчивость к тем видам нарушений, которым подвержена связь на коротких волнах.

Во время внезапных вспышек поглощения, вызванных увеличением ультрафиолетовой радиации Солнца, когда возрастает плотность ионизации слоя D и происходит замирание сигнала на коротких волнах, интенсивность сигнала на частотах выше 30—35 *Мгц* усиливается. На частотах 25—27 *Мгц* уровень сигнала несколько снижается, так как на этих волнах сказывается увеличение поглощения в слое D.

Возрастание уровня напряженности поля рассеянной волны наблюдается также во время ионосферно-магнитных возмущений, связанных с проникновением корпускул в нижние слои атмосферы. Это явление часто служит причиной полного нарушения коротковолновой связи в полярных областях.

Проведенные экспериментальные исследования позволили выяснить ряд особенностей и преимуществ связи на метровых волнах за счет рассеяния их на неоднородностях ионосферных слоев, а также определить возможную область применения и требования к аппаратуре при данном виде связи.

Выяснено, что наилучшие результаты получаются при длине трасс 1 000—2 300 *км*. При меньших расстояниях интенсивность сигнала быстро уменьшается. Бо́льшие расстояния не могут быть перекрыты путем однократного отражения от ионосферы, а при многократных рассеянных отражениях уровень сигнала чрезвычайно снижается.

Наиболее целесообразным оказывается применение диапазона частот 30—60 *Мгц*. Как указывалось, напряженность поля резко убывает с повышением рабочей частоты, что

обусловливает верхнюю границу применимого диапазона. Частоты ниже 30 *Мгц* испытывают поглощение и связь на них подвержена нарушениям, свойственным коротким волнам.

Рассматриваемый вид распространения радиоволн предъявляет повышенные требования к применяемой аппаратуре. Передатчик должен иметь значительную мощность. Например, для одноканальной телеграфной связи в арктических условиях на частоте 35 *Мгц* необходима мощность передатчика не менее 5 *квт*.

Во избежание приема запаздывающих сигналов, приходящих от следов метеорных тел или от слоя E_s появляющихся в стороне от основной трассы, необходимо применение остронаправленных антенн и сужение полосы пропускания приемника. Практически диаграмма направленности антенны может быть не уже 8°, а ширина полосы не уже 2 *кгц*.

Для устранения влияния замираний желательно применение двух приемных антенн, разнесенных на расстояние, примерно равное 10 длинам волн, в направлении, перпендикулярном направлению распространения. Предпочтительнее использование горизонтально поляризованных волн.

Основными преимуществами рассматриваемого вида связи можно считать следующие:

Отсутствие нарушений связи во время ионосферных возмущений, что обеспечивает надежную связь в сложных условиях арктических областей.

Возможность круглосуточной работы на одной и той же частоте (при работе на коротких волнах рабочие частоты меняются в зависимости от времени года и суток).

Уменьшение уровня помех. Уровень помех определяется в основном космическими шумами и шумами Солнца. На арктических трассах уровень шумов повышается во время буранов за счет движения снега и кристаллов льда.

Рассматриваемый вид распространения радиоволн может обеспечить радиотелеграфную связь с надежностью 99,5%. В арктических областях надежность связи снижается не более чем на 0,5%.

К недостаткам такого вида связи можно отнести повышенные требования к используемой аппаратуре и применимость его только для передачи узкой полосы частот.

Явление рассеяния радиоволн на неоднородностях ионосферы нашло уже практическое применение. Надежность такого вида связи в арктических условиях обусловила использование его именно в этом районе. Первая линия сверх-

дальней связи на УКВ соединила побережье США через Гренландию с Исландией. Таким образом, для перекрытия расстояния свыше 3 000 *км* потребовалась всего одна промежуточная станция. Эта линия рассчитана на передачу одного телефонного и восьми телеграфных (буквопечатающих) каналов.

Имеются сведения о сооружении таких же линий в Англии: одна линия свяжет северную и южную оконечности Британского острова, а вторая — Гибралтар с Англией. В ближайшее время предполагается сооружение УКВ линии связи из Европы через Средний Восток в Австралию и Новую Зеландию.

Очевидно, что явление рассеяния радиоволн в ионосфере не может быть использовано радиолюбителями, работающими с маломощными передатчиками.

Отражение от следов метеоров и полярных сияний

Еще в 1931 г. советским инженером, любителем астрономии Н. А. Ивановым было обнаружено, что при пролете метеорного тела изменяется слышимость коротковолновых радиопередач. Действительно, как было показано выше, от следа метеорного тела радиоволны отражаются так же, как и от ионосферных слоев.

Отчетливо это явление наблюдается при помощи радиолокационных установок. Специальные наблюдения за метеорами при помощи радиолокационных установок проводились в СССР впервые в 1946 г., когда Земля проходила через интенсивный метеорный поток.

Для наблюдений антенна радиолокационной станции направляется под небольшим углом к горизонту. При пролете метеорного тела в области действия радиолокатора на экране индикатора отмечается характерное эхо. Наблюдения показали, что отражение происходит на высоте 70—120 *км* на расстоянии 700—1 000 *км* от станции. По мере того как ионное облако следа метеора рассасывается и исчезает, радиоэхо слабеет и замирает. Было обнаружено, что более интенсивные отражения получаются на более длинных волнах. На волнах с частотой выше 100 *Мгц* отражения наблюдаются крайне редко.

Радиолокационные наблюдения метеоров натолкнули на мысль о возможности использования отражения радиоволн от следов метеорных тел для связи. Первые опыты связи провели радиолюбители Канады и США более 5 лет назад. Им удалось осуществлять кратковременные связи при работе

на волнах длиной 10—20 *м* на расстоянии 1 500—2 000 *км*, используя передатчики мощностью около 500 *вт*.

Недавно в печати появилось сообщение о том, что в Канаде разработана и вступила в эксплуатацию сравнительно простая система связи на метровых волнах, использующая отражение радиоволн от следов метеорных тел и построенная по схеме рис. 30.

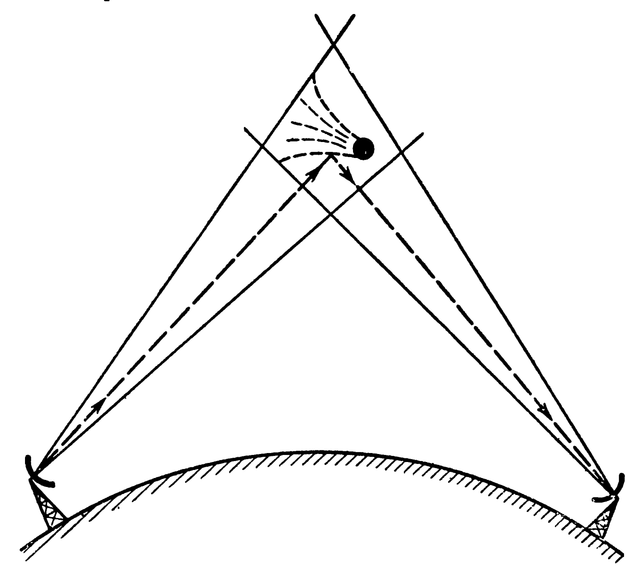


Рис. 30. Схема связи путем отражения от следов метеоров.

На обоих концах трассы размещаются передатчик и приемник с направленными антеннами. Антенны излучают под таким углом к горизонту, что их лучи пересекаются на высоте 70—120 *км* над земной поверхностью.

Передатчики и приемники непрерывно включены. Передатчик излучает немодулированные колебания. Пока в центральной части трассы не произошла метеорная ионизация, прием отсутствует. При появлении метеора сигнал, отраженный от его следа, может быть принят.

Как только сигнал принят, мгновенно автоматически включается модулятор, остающийся включенным все время, пока возможна связь. Спустя несколько секунд после появления метеора след метеора рассасывается. Условия для связи нарушаются, прием прекращается, и модулятор тотчас же автоматически выключается. Вся передача длится не более нескольких секунд. Процесс включения и выключе-

ния повторяется много раз в минуту. Таким образом, передача ведется как бы импульсами.

Для того, чтобы за короткое время, пока возможна связь, передать необходимый текст, приходится вести передачу на больших скоростях (порядка 2 000 слов в минуту). Используется особая система буквопечатающего радиотелеграфа, допускающая такие высокие скорости работы. Текст предварительно записывают специальным шифром.

При использовании отражения от метеорных следов возможна работа в диапазоне частот 30—60 *Мгц* при ширине полосы пропускания приемника 3 *кгц*. Этот вид связи не подвержен влиянию магнитных бурь, что особенно ценно в высоких широтах. Поэтому первая такая линия связи сооружена между заливом Шели и Порт-Артуром (США), т. е. в области полярных сияний, где магнитные бури особенно часты. Протяженность линии составляет примерно 1 600 *км*. За 2 года работы этой линии она показала себя достаточно надежной и экономичной.

Радиоволны метрового диапазона могут отражаться от областей полярных сияний. Если в северном полушарии в районе, где наблюдаются полярные сияния, передающую и приемную антенны направить на север, то при появлении полярных сияний возможно осуществление радиосвязи между пунктами, расположенными на расстоянии свыше 1 000 *км*. При отсутствии полярных сияний связь между теми же пунктами не осуществляется.

При таком виде распространения радиволн для связи не требуются мощные передатчики и сложные антенны, поэтому отражение от полярных сияний может быть использовано для радиолюбительской связи.

Радиолюбители Канады неоднократно проводили опыты дальней связи на частотах 28—148 *Мгц* путем отражения волн от полярных сияний. Интересно, что отражение от полярного сияния наблюдалось на станции, лежащей на 1 200 *км* южнее края зоны полярных сияний.

Отражение радиоволны от полярных сияний позволяет вести наблюдения за ними при помощи радиолокаторов.

ГЛАВА ШЕСТАЯ

ПОМЕХИ ПРИЕМУ УКВ

Условия приема определяются не абсолютным значением напряженности поля сигнала, а отношением напряженности поля сигнала к уровню помех. Для каждого вида связи напряженность поля сигнала должна превосходить уровень

помех в большее или меньшее число раз. Зная этот коэффициент уровня помех, можно определить необходимую напряженность поля в месте приема. Здесь мы будем рассматривать только внешние по отношению к приемной аппаратуре помехи, не касаясь внутренних шумов приемника.

В диапазоне УКВ действуют промышленные помехи, помехи космического происхождения и атмосферные помехи. Промышленные помехи создаются различными электрическими установками. Сильные помехи создают рентгеновские установки. В городах существенны помехи от зажигания моторов автомобилей. Существенными оказываются также помехи от гармоник коротковолновых радиостанций.

В последнее время стали наблюдаться помехи телевидению, создаваемые удаленными телевизионными станциями. Эти помехи сказываются больше всего на расстоянии 40—60 *км* от местного телецентра, где напряженность поля местного телецентра мала и применяются чувствительные приемники и антенны с большим коэффициентом усиления. Эти интерференционные помехи проявляются в виде шума в канале звукового сопровождения и в виде «муара» на экране трубки.

Помехи другого вида создают самолеты. При пролете самолета вблизи приемной антенны он переизлучает энергию радиоволны, что создает интерференционные помехи. Там, где над городом самолеты летают часто, эти помехи оказываются существенными. Так, в США борьба с помехами телевидению, создаваемыми самолетами в некоторых районах превратились в проблему.

Космические помехи создаются радиоизлучением Галктики и Солнца. Помехи эти проявляются как шум на входе приемника. Радиоизлучение Солнца проявляется как помеха радиоприему при использовании остронаправленных приемных антенн, притом только в тех случаях, когда антенны оказываются направленными на Солнце. Особенно сильны помехи в годы максимума солнечной активности. Радиоизлучение Галактики является помехой и при ненаправленных антеннах.

Чувствительность приемного устройства в диапазоне УКВ определяется уровнем шумов в активном сопротивлении антенной цепи. Под действием галактических помех как бы возрастает уровень шума, создаваемый активным сопротивлением антенны. Для количественной оценки галактических помех пользуются коэффициентом β, который показывает. во сколько раз возрастает уровень шума на входе приемника при появлении галактических помех. В диапазо-

не метровых волн зависимость коэффициента β от частоты (в мегагерцах) хорошо совпадает с выражением

$$\beta = \frac{1,8 \cdot 10^6}{f}, \qquad (19)$$

т. е. помехи интенсивнее на более низких частотах.

Атмосферные помехи в диапазоне УКВ несущественны. Они сводятся в основном к помехам от местных гроз. В северных областях наблюдается другой своеобразный вид помех: во время снежных буранов частицы снега и льда перемещаются с громадными скоростями. При этом в результате трения они электризуются, что создает помехи в виде шума. Уровень такого шума тем больше, чем больше скорость ветра.

Разные виды передач требуют для удовлетворительного приема различного соотношения между уровнем сигнала и шума. Наиболее высокие требования предъявляет телевидение. Здесь желательно иметь отношение сигнал/помеха не менее 30 *дб*. При этом напряженность поля сигнала должна быть от 100 *мкв/м* в диапазоне частот 50—80 *Мгц* до 1 000 *мкв/м* в диапазоне частот выше 200 *Мгц*. В городах, где сильны внешние помехи, напряженность поля должна достигать 5 000 *мкв/м*. Наличие помех увеличивает потребную мощность передатчика.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы кратко познакомились с основными особенностями распространения УКВ. При этом неоднократно указывалось, что далеко не все явления в этой области полностью изучены.

Распространение радиоволн — процесс весьма сложный, подверженный влиянию разнообразных природных явлений. На условия распространения УКВ оказывают влияние как процессы, происходящие далеко за пределами земной атмосферы (появление солнечных пятен, вспышки на Солнце, космические лучи, метеоры), так и процессы происходящие вблизи земной поверхности (в ионосфере и тропосфере) и на самой земной поверхности (здания, сооружения и движение транспорта). Условия распространения радиоволн изменяются в зависимости от времени суток, времени года, солнечной активности и погоды.

Для изучения сложных явлений требуется большое количество наблюдений. Условия распространения радиоволн необходимо наблюдать в разное время, на различных расстояниях и в различных областях. Обобщая такие наблюде-

ния, исследователи могут выявить определенные закономерности, обосновать их теоретически, получать расчетные формулы или из опытов эмпирические поправки к расчетным формулам. Это позволит в дальнейшем правильнее вести расчет линий радиосвязи и вещания, даст возможность предсказать вероятные нарушения связи и предусмотреть способы борьбы с ними. При современном массовом развитии радиолюбительства в изучении явлений распространения радиоволн большую роль могут играть наблюдения радиолюбителей. Важно только, чтобы радиолюбитель вел запись своих наблюдений по возможности систематически и внимательно, указывал дату, часы наблюдения и тип или особенности применяемой им аппаратуры.

Большой интерес представляют наблюдения за сверхдальним приемом УКВ. Здесь еще много неизученных вопросов. Интересны случаи как тропосферного распространения УКВ на расстояния 200 *км* и выше (возможно до 600—800 *км*), так и ионосферного (свыше 1 000—1 500 *км*).

Такие наблюдения уже проводились. Летом 1956 г. радиолюбители Морозов в Полтаве и Сотников в Москве вели наблюдения за сверхдальним приемом телевизионных передач иностранных станций, работавших в диапазоне частот 40—60 *Мгц* и расположенных на расстояниях свыше 1 000 *км*. Большую ценность представляют дневники наблюдений. Анализ и сопоставление этих наблюдений позволили выяснить интересную особенность отражения радиоволн от спорадического слоя E_s и объяснить, почему сверхдальний прием возможен чаще, чем на то указывают данные ионосферных станций.

Наблюдения за сверхдальними связями на УКВ радиолюбителей в США дали возможность американскому исследователю построить карты перемещения слоя E_s и подсчитать скорость его движения. Такие же результаты были получены у нас при обработке данных приема пражского телецентра в Московской обл. К сожалению, подмосковные радиолюбители не вели систематических наблюдений, и поэтому определение перемещения слоя E_s было возможно только несколько дней.

Наблюдения радиолюбителей за приемом телевизионных передач в США в диапазонах 50—80 и 170—200 *Мгц* убедительно показали, что более короткие волны распространяются тропосферным путем и на расстоянии не выше 800 *км*, а более длинные — чаще ионосферным путем на расстояния свыше 1 000 *км*.

Большую ценность представили бы наблюдения радиолюбителей, работающих в диапазоне УКВ, за сверхдальним приемом телевизионных передач. В случае ионосферного приема (передача телецентра, расположенного на расстоянии свыше 1 000 *км*) интересно отметить направление, в котором прием был наилучшим. В случае тропосферного распространения (передача телецентра, расположенного на расстоянии до 800 *км*) следует отметить, кроме того, состояние погоды (ясно, пасмурно, ветер) и, если возможно, давление и температуру воздуха.

При установлении УКВ связей на большие расстояния желательно отмечать те же данные и, кроме того, была ли связь двусторонней.

Большой интерес представляет также установление УКВ связи на неровной, гористой или сильно застроенной местности.

Каждый раз при проведении наблюдений необходимо записывать дату и часы наблюдения, рабочую волну, данные используемой аппаратуры (чувствительность приемника, тип антенны и ее расположение, мощность передатчика), место приема (среди высоких зданий, на открытом месте, среди деревьев и т. д.) и местонахождение передающей станции, расстояние, качество и длительность приема, наличие замираний, направление прихода волны (интересно сопоставить с направлением на корреспондента, определенным по карте) и данные погоды (при тропосферном распространении).

Результаты наблюдений (за 2—3 мес.) следует направлять в Московский ордена Ленина энергетический институт (Москва, Красноказарменная ул., д. 14, Кафедра антенных устройств и распространения радиоволн), где они будут сопоставлены с результатами наблюдений других радиолюбителей и использованы с научной целью.

ЛИТЕРАТУРА

Анисимов В. Ф., Дальний прием телевидения, Изд. ДОСААФ, 1956.

Долуханов М. П., Как распространяются радиоволны, Связьиздат, 1954.

Жеребцов И. П., Техника метровых волн, Изд. ДОСААФ, 1955.

Кугушев А. М., Ультракороткие волны и их применение, Изд. «Знание», 1955.

Плонский А. Ф., Любительская радиосвязь на метровых волнах, Госэнергоиздат, 1953.

Прессман С. А., Сантиметровые волны, Госэнергоиздат, 1954.

Шкловский И. С., Радиоастрономия, Гостехиздат, 1953.

Чечик П. О., Радиотехника и электроника в астрономии, Госэнергоиздат, 1953.

СОДЕРЖАНИЕ

Цена 1 р. 50 к.